

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ.
Розділ: СИНХРОННІ МАШИНИ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до практичних занять з дисципліни
“Електричні машини” для студентів освітньо-кваліфікаційного
рівня “бакалавр” напрямку підготовки
6.050702 “ Електромеханіка ”

*Рекомендовано Вченою Радою факультету
електроенерготехніки та автоматики НТУУ “КПІ”*

Київ
НТУУ «КПІ»
2014

УДК 621.313.333

Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни “Електричні машини”. Розділ “Синхронні машини” для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня “бакалавр” напряму підготовки 6.050702 “Електромеханіка”/ Уклад.: Ю.М. Васьковський, О.А. Гераскін. – К.: НТУУ “КПІ”, 2014. – 45 с.

*Рекомендовано Вченою Радою факультету
електроенерготехніки та автоматики НТУУ “КПІ”
(Протокол №__ від __.__.____ р.)*

На в ч а л ь н е в и д а н н я

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ.

Розділ: СИНХРОННІ МАШИНИ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять з дисципліни
“Електричні машини” для студентів освітньо-кваліфікаційного
рівня “бакалавр” напряму підготовки
6.050702 “Електромеханіка”

Укладачі: *Васьковський Юрій Миколайович, д-р техн. наук, проф.*
 Гераскін Олександр Анатолійович, канд. техн. наук.

Відповідальний
редактор *В.Ф. Шинкаренко, д-р техн. наук, проф.*

Рецензент *М.Я. Островерхов, канд. техн. наук., доц.*

© НТУУ “КПІ”, 2014

© Ю.М. Васьковський, О.А. Гераскін, 2014

ПЕРЕДМОВА

Методичні вказівки містять стислий теоретичний опис до кожного розділу, формули і контрольні задачі до практичних занять з кредитного модулю “Електричні машини - 2” дисципліни “Електричні машини”, що вивчається на кафедрі електромеханіки Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”. Зокрема, в методичних вказівках представлені контрольні задачі з розділу “Синхронні машини” для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня “бакалавр” напряму підготовки 6.050702 “Електромеханіка”.

Використання матеріалу методичних вказівок під час проведення практичних занять, виконання домашніх контрольних робіт та самостійної роботи дозволить студентам поглибити та закріпити теоретичні знання, які вони отримали при прослуховуванні лекційного курсу. Методичні вказівки також можуть використовуватися студентами інших електромеханічних та електроенергетичних спеціальностей, які вивчають дисципліну “Електричні машини”.

Зміст та теми методичних вказівок відповідають: змісту навчального плану кафедри електромеханіки для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня “бакалавр” напряму підготовки 6.050702 “Електромеханіка”; навчальній програмі дисципліни “Електричні машини”; робочій навчальній програмі кредитного модулю “Електричні машини - 2”.

Умови типових завдань містять кілька варіантів, що полегшує видачу домашніх завдань і проведення контрольних робіт. Всі завдання забезпечені відповідями, а в разі набору варіантів, відповідь наведено для першого з них.

Частина завдань має мету навчити студента розраховувати певні характеристики синхронних машин за відомими паспортними або каталожними даними. В цьому випадку частина паспортних даних може бути не використана при вирішенні задач.

Корисна література, яка допоможе в розв’язанні запропонованих задач, наведена в посиланнях [1-11].

ЗМІСТ

1. Магнітне поле і параметри обмотки збудження синхронних машин	5
2. Магнітне поле і параметри обмотки якоря синхронних машин.....	9
3. Векторні діаграми напруги і характеристики синхронних машин.....	16
4. Паралельна робота синхронних генераторів.....	24
5. Синхронні двигуни і синхронні компенсатори.....	33
6. Перехідні процеси, колювання і несиметричні режими синхронних машин...	37
Відповіді до завдань.....	43
Перелік рекомендованої літератури	45

1. Магнітне поле і параметри обмотки збудження синхронних машин

Теоретичні відомості і формули [11]:

Явнополюсна машина. На рис. 1.1, а і рис. 1.2, а зображено магнітне поле обмотки збудження в повітряному проміжку відповідно для явнополюсної і неявнополюсної синхронної машини вздовж полюсної поділки τ . Розподіл магнітної індукції поля обмотки збудження B_f на внутрішній поверхні якоря представлено на рис. 1.1, б і рис. 1.2, б. Реальний розподіл (1) магнітної індукції B_f , внаслідок несинусоїдальності, можна розкласти на основну (2) та вищі гармонійні складові.

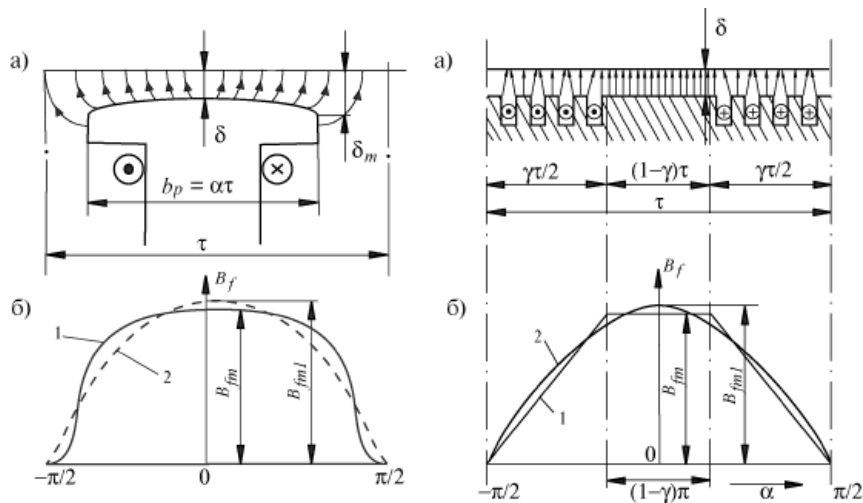


Рис.1.1 Магнітне поле явнополюсної СМ Рис. 1.2 Магнітне поле неявнополюсної СМ

Гармоніки поля обмотки збудження індукують в обмотці якоря основну та вищі гармоніки ЕРС. Вищі гармоніки ЕРС малі, оскільки малі відповідні їм гармоніки магнітної індукції поля обмотки збудження, а також через укорочення кроку обмотки якоря та її розподілу.

Амплітуда основної гармоніки поля дорівнює

$$B_{fm1} = k_f \cdot B_{fm} ,$$

де $B_{fm} = \frac{\mu_0}{k_\delta \cdot k_{\mu d} \cdot \delta} \cdot F_f \cdot k_f$ - амплітуда реального розподілу індукції поля обмотки збудження;

$k_f = \frac{B_{fm1}}{B_{fm}}$ - коефіцієнт форми поля обмотки збудження;

δ - мінімальний повітряний проміжок; δ_m - максимальний повітряний проміжок ;

b_p - довжина дуги полюсного наконечника; a - коефіцієнт полюсної дуги;

μ_0 - магнітна проникність повітря ; k_δ - коефіцієнт повітряного зазору ;

$k_{\mu d}$ - коефіцієнт насичення магнітного кола по поздовжній осі (поздовжня вісь d збігається з поздовжньою віссю симетрії кожного полюса індуктора, поперечна вісь q посередині між сусідніми головними полюсами) ; $F_f = \frac{w_f \cdot i_f}{2p}$ - магніторушійна сила (МРС) полюса обмотки збудження; w_f , i_f - число витків і струм обмотки збудження.

Зазвичай $\frac{\delta_m}{\delta} = 1 \div 2.5$, $a = 0.65 \div 0.75$, що дозволяє забезпечити високі значення коефіцієнта форми поля обмотки збудження $k_f = 0.95 \div 1.15$.

Неявнополюсна машина. На рис.1.2, а показано магнітне поле обмотки збудження в повітряному зазорі неявнополюсної синхронної машини вздовж полюсної поділки τ . Розподіл магнітної індукції поля обмотки збудження на внутрішній поверхні якоря представлено на рис.1.2, б. Реальний розподіл (1) магнітної індукції B_f має вигляд трапеції, яку можна розкласти на основну (2) та вищі гармонійні складові.

Амплітуда основної гармоніки поля обмотки збудження

$$B_{fm1} = \frac{\mu_0}{\delta} \cdot \frac{W_f \cdot i_f}{2p} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot k_{обf},$$

де $k_f = \frac{4}{\pi} \cdot k_{обf}$ - коефіцієнт форми поля обмотки збудження;

$k_{обf} = \frac{\sin(\gamma \cdot \frac{\pi}{2})}{\gamma \cdot \frac{\pi}{2}}$ - обмотувальний коефіцієнт обмотки збудження; γ - відношення числа пазів обмотки збудження до повного числа пазових поділів зовнішньої поверхні індуктора. Зазвичай $\gamma = 0.65 \div 0.8$, що дозволяє отримати $k_f = 1.065 \div 0.965$.

МРС обмотки збудження на один полюс $F_f = \frac{W_f \cdot i_f}{2p}$,

де W_f - число витків, а i_f - струм обмотки збудження.

Амплітуда основної гармоніки поля збудження

$$B_{fm1} = k_f \cdot B_{fm} = \frac{\mu_0}{k_{\mu d} \cdot k_{\delta} \cdot \delta} \cdot F_f \cdot k_f = \frac{\mu_0}{k_{\mu d} \cdot k_{\delta} \cdot \delta} \cdot \frac{W_f \cdot i_f}{2p} \cdot k_f,$$

де $k_{\mu d}$ - коефіцієнт насичення магнітного кола по поздовжній осі.

Коефіцієнт зазору k_{δ} визначається для середнього розрахункового зазору

$$\delta_p = \delta + \frac{1}{3}(\delta_m - \delta)$$

Потік Основної форми основної гармоніки поля збудження

$$\Phi_{f1} = \frac{2}{\pi} \cdot B_{fm1} \cdot \tau \cdot l_{\delta} = \frac{\mu_0 \cdot \tau \cdot l_{\delta}}{\pi \cdot k_{\mu d} \cdot \delta} \cdot \frac{W_f \cdot i_f}{p} \cdot k_f,$$

де l_{δ} - довжина повітряного проміжку, $\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p}$ - полюсна поділка.

Потокозчеплення основної гармоніки поля збудження з фазою обмотки якоря, коли вісь фази співпадає з віссю полюсів,

$$\Psi_{fad} = W \cdot k_{об} \cdot \Phi_{f1} = M_{fad} \cdot i_f$$

При обертанні ротора з електричною кутовою частотою

$$\omega_1 = 2\pi \cdot f$$

При цьому в якорі індукується ЕРС

$$e = -\frac{d\Psi_{fad}}{dt} = \omega_1 \cdot M_{fad} \cdot i_f \cdot \sin \omega t = x_{fad} \cdot i_f \cdot \sin \omega t,$$

де $x_{fad} = \omega_1 \cdot M_{fad}$ - опір взаємоіндукції обмотки збудження з обмоткою якоря.

Задачі:

1.1 В табл. 1.1 приведені в абсолютних одиницях характеристики холостого ходу (х.х.х) турбогенераторів. Необхідно побудувати характеристики у відносних одиницях (в.о.).

Таблиця 1.1.

Турбогенератор, $U_H = 10,5$ кВ							
E_f , кВ	6,1	10,5	12,7	14	14,7	15,3	15,9
i_f , А	66	132	198	264	330	396	462
Турбогенератор, $U_H = 6,3$ кВ							
E_f , кВ	3,34	6,3	7,75	8,2	-	-	-
i_f , А	215	430	645	860	-	-	-

- 1.2 Виконати кусково-лінійну апроксимацію нормальних х.х.х., заданих у відносних одиницях (в.о.) в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

	i_f	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
Турбогенератори	E_f^*	0,58	1	1,21	1,33	1,4	1,46	1,51
Гідрогенератори	E_f^*	0,53	1	1,23	1,3	-	-	-

- 1.3 Побудувати залежність $k_{\mu d} = f(i_f^*)$ використовуючи нормальні х.х.х. турбо і гідрогенераторів.
- 1.4 На рис. 1.3 приведена крива магнітного поля збудження в повітряному проміжку неявнополісної машини. Визначити максимум і мінімум k_f . Побудувати для цих випадків криву поля. Чи застосовується такий розподіл поля в неявнополісних машинах?

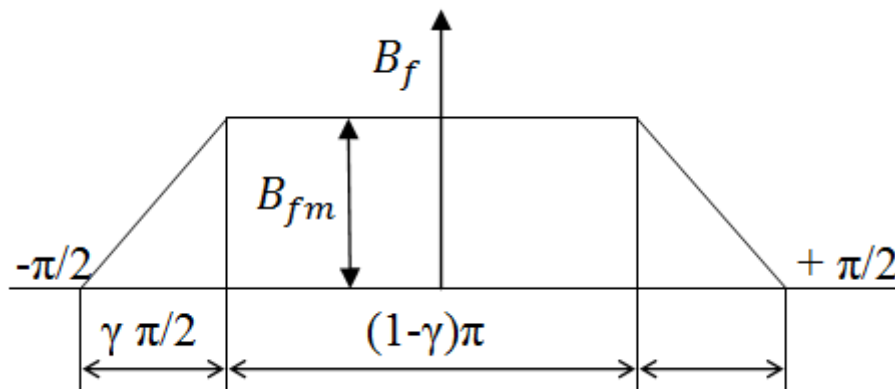


Рисунок 1.3 Крива магнітного поля збудження

- 1.5 За даними таблиці 1.3 і кривої поля збудження неявнополісних машин рис.1.3 визначити B_{fm1} .

Таблиця 1.3

Вариант \ Величина	1	2	3	4
$B_{fm}, \text{Тл}$	0,95	0,9	0,85	0,8
$r, \text{Ом}$	0,8	0,75	0,6	0,65

- 1.6 Визначити значення B_{fm1} , якщо відомі: $E_{f\infty}^* = 0,53; 1,06; 1,16; 2$; $f_1 = 50$ Гц; $U_{\text{лн}} = 6,3$ кВ. Схема з'єднання фаз “зірка”, нормальна х.х.х. і дані наведені в табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Вариант \ Величина	p	$D, \text{м}$	$l_d, \text{м}$	$k_{об}$	w
1	3	0,62	0,4	0,955	312
2	1	0,7	1,3	0,94	72

- 1.7 Турбогенератор на х.х. при $i_f = i_{f0}$ має $B_{fm} = 0,8$ Тл. Визначити значення B_{fm1} при зміні i_f на $\pm 10\%$, $\pm 20\%$, якщо задані нормальна х.х.х. та $k_{обf} = 0,83$.
- 1.8 Дані генератора приведені в табл.1.5. Визначити $M_{fad\infty}$ і $x_{fad\infty}$, якщо $f_1 = 50$ Гц і з'єднання фаз “зірка”.

Таблиця 1.5

Вариант \ Величина	i_{f0}	$U_{\text{лн}}$	$E_{f\infty}^*$
1	430	6,3	1,06
2	600	10,5	1,06
3	132	6,3	1,16
4	60	0,4	1,16

- 1.9 Визначити фазні і лінійні ЕРС якоря від 1-ої, 3-ої, 5-ої, 7-ої гармонік поля збудження турбогенератора, якщо $f_1 = 50$ Гц, поле збудження показано на рис.1.1, дані наведені в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6

Величина Варіант	γ	w	Z_1	y/τ	$\tau, \text{ м}$	$l_d, \text{ м}$	$B_{fm1}, \text{ Тл}$
1	0,65	46	60	3/5	0,8	1,2	0,7
2	0,85	34	60	3/5	0,6	1	0,7

2. Магнітне поле і параметри обмотки якоря синхронних машин

Теоретичні відомості і формули [11]:

При наявності струму в обмотці якоря синхронної машини виникає магнітне поле, дія якого на магнітне поле обмотки збудження називається реакцією якоря.

Індуктор (ротор) явнополюсної машини має магнітну несиметрію внаслідок великого магнітного опору міжполюсного проміжку (поперечна вісь q). Крім того, ротор синхронної машини (як явнополюсної, так і неявнополюсної) має і електричну несиметрію, так як вісь обмотки збудження кожного полюса розташована тільки по поздовжній осі d .

Зважаючи на наявність магнітної несиметрії у явнополюсного індуктора виникає необхідність розглядати дію реакції якоря по поздовжній і поперечній осях окремо. Метод такого розгляду називається методом або теорією двох реакцій. При цьому передбачається, що магнітні потоки, що діють по поперечній осі, не впливають на значення потоків, діючих по поздовжній осі, і навпаки.

Продольна і поперечна реакції якоря.

Розглянемо дію реакції якоря синхронного генератора при сталому симетричному навантаженні (рис.2.1). Обмотка якоря зображена у вигляді спрощеної трифазної обмотки, як при розгляді обертового магнітного поля асинхронної машини. Кожна фаза являє собою виток з повним кроком ($A - X, B - Y, C - Z$).

Полярність поля обмотки збудження позначена буквами N, S а силові лінії цього поля не зображено.

Синхронні генератори зазвичай працюють на змішану навантаженні (активно-індуктивному або активно-ємнісному). Для з'ясування впливу реакції якоря на роботу синхронного генератора розглянемо випадки його роботи при навантаженнях граничного характеру: активному, індуктивному та ємнісному.

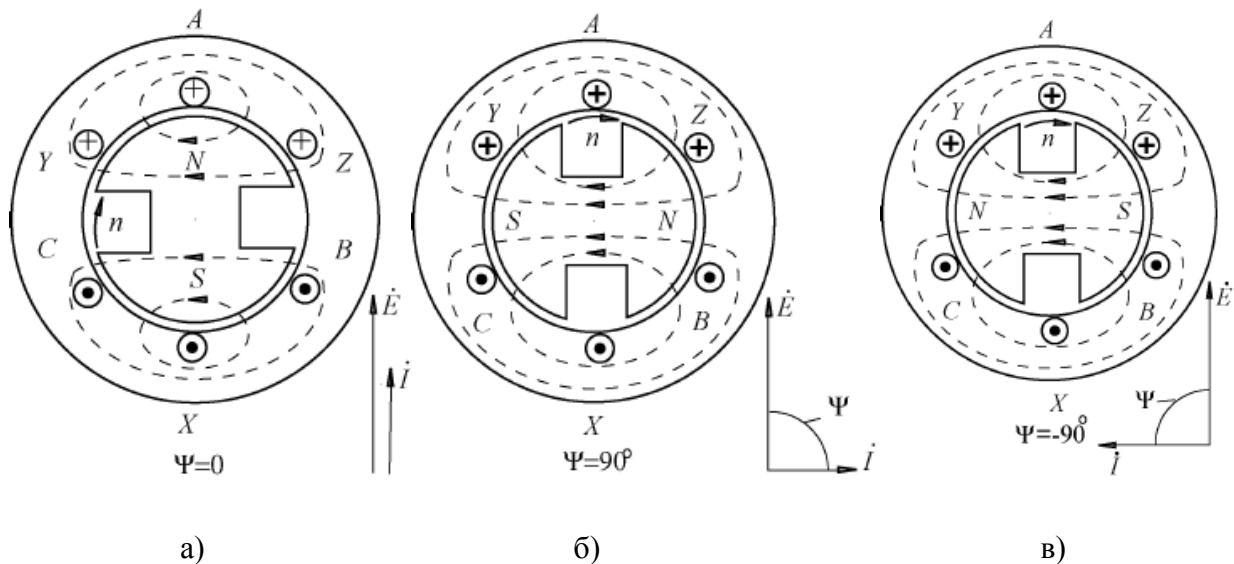


Рис. 2.1 Реакції якоря синхронного генератора при різних видах навантаження

Активне навантаження. Для положення, яке займає обертовий ротор, ЕРС фази А максимальна. Так як кут $\psi = 0$, то струм фази А також максимальний $i_A = I_m$, а в інших фазах $i_B = i_C = -0.5I_m$ (рис.2.1, а).

Напрями ЕРС і струмів неважко встановити за правилом правої руки і позначити хрестиками й крапками. При цих напрямках струмів вісь магнітного поля реакції якоря направлена по поперечній осі q . Напрямок поля реакції якоря для кута $\psi = 0$ зберігається для будь-якого положення обертового ротора, тому що ротор і поле реакції якоря обертаються синхронно.

Індуктивне навантаження. У разі індуктивного навантаження кут між ЕРС E^* обмотки якоря E^* і струмом I^* дорівнює 90 ел. град. (рис.2.1, б).

Це означає, що максимум струму в фазі А настане в порівнянні з попереднім випадком на чверть періоду пізніше, коли ротор повернеться на 90° за годинникову стрілку. При відстаючому струмі реакція якоря діє по поздовжній осі і по відношенню до поля обмотки збудження є розмагнічуючою (поздовжня розмагнічує реакція якоря).

Ємнісне навантаження. У разі ємнісного навантаження кут зсуву ψ між ЕРС обмотки якоря і струмом дорівнює -90 ел. град. (рис.2.1, в). Це означає, що максимум струму в фазі А настане в порівнянні з випадком рис.2.1, а на чверть періоду раніше. При випереджаючому струмі реакція якоря діє по поздовжній осі і по відношенню до поля обмотки збудження є намагнічуючою (поздовжня намагнічує реакція якоря).

При змішаному навантаженні, коли $\psi \neq 0$ і $\psi \neq \pm 90^\circ$ струм можна розкласти на дві складові (рис.2.4), $I_d = I \cdot \sin \psi$, $I_q = I \cdot \cos \psi$ де I_d , I_q - поздовжня і поперечна складові струму якоря.

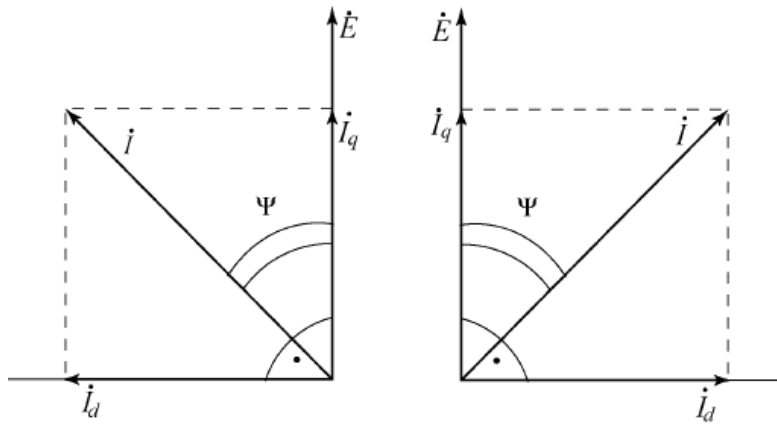


Рис. 2.4 Розкладання струму якоря на повздовжню і поперечну складові

Формули [6]:

Амплітуди основної гармоніки повздовжньої і поперечної МРС реакції якоря

$$F_{ad} = \frac{m \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W \cdot k_{об}}{p} \cdot I_d,$$

$$F_{aq} = \frac{m \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W \cdot k_{об}}{p} \cdot I_q.$$

Можна розглядати як складові повної МРС якоря по осям d та q

$$F_a = \frac{m \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W \cdot k_{об}}{p} \cdot I.$$

Тоді

$$F_{ad} = F_a \cdot \sin \varphi;$$

$$F_{aq} = F_a \cdot \cos \varphi.$$

Основні гармоніки полів продольної і поперечної реакції якоря створюють потоки реакції якоря

$$\Phi_{ad} = \frac{2}{\pi} \cdot B_{adm} \cdot k_{ad} \cdot \tau \cdot l_\delta;$$

$$\Phi_{aq} = \frac{2}{\pi} \cdot B_{aqm} \cdot k_{aq} \cdot \tau \cdot l_\delta;$$

де залежності k_{ad} та k_{aq} наводяться в посібниках. Для неявно полюсної машини внаслідок рівномірності зазора $k_{ad} = k_{aq} = 1$.

Потоки Φ_{ad} та Φ_{aq} індують в обмотці якоря ЕРС самоіндукції

$$E_{ad} = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot f_1 \cdot W \cdot k_{об} \cdot \Phi_{ad},$$

$$E_{aq} = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot f_1 \cdot W \cdot k_{об} \cdot \Phi_{aq}.$$

Для індуктивного опору:

$$x_{ad} = 4mf_1 \cdot \frac{\mu_0 \cdot \tau \cdot l_\delta}{\pi \cdot k_{\mu d} \cdot k_\delta \cdot \delta} \cdot \frac{W^2 \cdot k_{об}^2}{p} \cdot k_{ad},$$

$$x_{aq} = 4mf_1 \cdot \frac{\mu_0 \cdot \tau \cdot l_\delta}{\pi \cdot k_{\mu q} \cdot k_\delta \cdot \delta} \cdot \frac{W^2 \cdot k_{об}^2}{p} \cdot k_{aq}.$$

Для неявнополюсних синхронних машин $x_{ad} = x_{aq}$.

Задачі:

2.1 Виразити у в.о. величини струмів, напруг, фазних опорів генераторів. Схема з'єднання фаз “зірка”. Інші дані приведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

	Турбогенератори			Гідрогенератори		
Варіант Величина	1	2	3	4	5	6
S_H , кВА	1,25	3	3,75	15	18	33
$U_{лн}$, кВ	0,4	3,15	6,3	6,6	10,5	11
U_L , кВ	0,38	3	6	6,3	10	10,5
I_L , А	1810	275	86	605	745	870
$x_{\sigma a}$, Ом	0,0184	0,6	1,28	0,603	1,21	0,58
r_1 , Ом	0,00162	0,06	0,0852	0,0339	0,0445	0,0145

2.2 Визначити відносне значення струмів, напруг і індуктивних опорів, відносні значення яких приведені в таблиці 2.2. Схема з'єднання фаз “зірка”.

Таблиця 2.2

	Турбогенератори			Гідрогенератори		
Варіант Величина	1	2	3	4	5	6
P_H , кВт	1,25	3	3,75	15	18	33
$\cos \varphi$	0,8	0,8	0,84	0,8	0,8	0,8
U_H , кВ	6,3	6,3	6,3	10,5	10,5	13,8
U^*	0,95	1,05	0,5	0,5	1,05	0,95
I^*	0,5	0,75	1,25	2	1,75	1,4
x_d^*	2,72	2,66	2,6	1,63	1,6	1,55
x_q^*	2,72	2,66	2,6	1,04	0,965	0,925

2.3 Визначити F_{ad} і F_{aq} трифазних генераторів, дані яких наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Величина Варіант	I, A	$\cos \varphi$	w	p	$k_{об}$
1	30	0,8	310	1	0,8
2	40	0,9	312	2	0,92
3	50	0,8	320	2	0,904
4	40	0,6	40	1	0,88

2.4 Визначити основні гармоніки поля повздовжньої і поперечної реакції якоря трифазних генераторів за даними таблиці 2.4. Схема з'єднання фаз “зірка”.

Таблиця 2.4

Величина Варіант	$S_H,$ кВА	$U_{лн},$ кВ	I^*	w	p	$k_{об}$	$\psi,$ град
1	9,25	0,6	1	48	6	0,923	37
2	7,15	13,8	1	114	48	0,937	44,5

Продовження таблиці 2.4

Величина Варіант	k_δ	$k_{\mu d}$	$k_{\mu q}$	k_{ad}	k_{aq}	δ
1	1,13	1,1	1,1	0,89	0,49	0,018
2	1,16	1,11	1	0,9	0,6	0,0185

2.5 Визначити приведені до обмотки збудження намагнічуючі сили і струми якоря трифазних генераторів, якщо з'єднання фаз “зірка” і дані представлені в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Величина \ Варіант	1	2	3	4
S_H , кВА	477	675	1200	1600
$U_{лн}$, кВ	6	6	6	10
I^*	1	0,5	1	0,75
w	312	300	100	90
w_f	328	250	100	70
P	4	3	1	1
$k_{об}$	0,9	0,92	0,93	0,94
ψ , град	37	53	58,3	48
k_{ad}	0,913	0,943	-	-
k_{aq}	0,287	0,391	-	-
k_f	1,032	1,104	-	-
γ	-	-	0,65	0,8

2.6 Побудувати характеристики короткого замикання (х.к.з.) генераторів в абсолютних і в.о. по величинам, приведеним в табл. 2.6. Схема з'єднання фаз “зірка”.

Таблиця 2.6

Величина \ Варіант	P_H , МВт	$\cos\varphi$	$U_{лн}$, кВ	i_{f0} , А	X_d^*
1	25	0,9	11	100	1
2	100	0,85	11	200	1,5
3	1,5	0,8	3,15	65	2,32
4	6	0,8	10,5	132	1,56

2.7 Визначити x_d і x_q в Омах і у в.о., якщо відомі точки характеристик: х.х.х. $i_f^* = 0,5$; $E_f^* = 0,58$ і х.к.з. $i_f^* = 1,5$; $I_k^* = 1$. Паспортні дані двигуна: $P_{2H} = 5000$ кВт, $U_{нл} = 11$ кВ, $\cos\varphi_H = 0,9$, $\eta = 0,97$; з'єднання фаз “зірка”.

2.8 Визначити x_d в Омах і у в.о. за даними з таблиці 2.7, якщо з'єднання фаз “зірка”.

Таблиця 2.7

Величина Варіант	P_H , МВт	$U_{лн}$, кВ	$\cos \varphi_H$	I_k^*
1	100	13,8	0,9	1,67
2	0,4	6,3	0,8	1,22

2.9 Визначити $x_{d\infty}^*$ і x_d^* , якщо при i_{f0}^* маємо:

- 1) $E_{f\infty}^*=1,16$; $I_k^*=0,7$;
- 2) $E_{f\infty}^*=1,3$; $I_k^*=1,7$.

2.10 Визначити відношення короткого замикання (ВКЗ) і x_d^* по х.к.з.:

- 1) $I_k^*=0,82i_f$;
- 2) $I_k^*=1,4i_f$.

2.11 Для гідрогенератора визначити I_{fk}^* , при якому в режимі трифазного короткого замикання $I_k^*=1$, якщо $i_{f0}^*=0,83$, а ВКЗ=1,36. Визначити також величину x_d^* .

2.12 Визначити величину $k_{\mu d}$, якщо відомі: $x_{d\infty}^*=1,75$ і ВКЗ=0,8.

2.13 На основі прямолінійних частин характеристик х.х. і к.з., що приведені в табл. 2.8, визначити параметри синхронних генераторів: x_d^* , $x_{d\infty}^*$, ВКЗ, $k_{\mu d}$. Точки характеристик задані при $i_f^*=1$.

Таблиця 2.8

Величина Варіант	1	2	3	4
E_f^*	1,16	1,06	1,16	1,06
I_k^*	0,667	0,77	0,8	0,9

2.14 Визначити k_{id} , якщо в табл. 2.9 задані прямолінійні частини характеристик х.х. і к.з., а також параметр $x_{\sigma a}^*$. Точки характеристик задані при $i_f^*=1$.

Таблиця 2.9

Величина \ Варіант	1	2	3
E_f^*	1,14	1,06	1,06
I_k^*	1,21	1,13	1,3
$x_{\sigma a}^*$	0,1	0,151	0,14

2.15 Визначити величину $x_{\sigma a}^*$, якщо задані:

а) нормальна х.х.х;

б) х.к.з:

1) $I_k^* = 1.22i_f^*$;

2) $I_k^* = 1.18i_f^*$

в) навантажувальна характеристика (табл. 2.10) при $\cos\varphi = 0$ і $I = I_N$:

Таблиця 2.10

U^*	0	0,5	0,85	1	1,1	1,15
i_f^*	0,82	1,3	1,82	2,26	2,7	3

3. Векторні діаграми напруги і характеристики синхронних машин

Теоретичні відомості і формули [11]:

Явнополюсна машина. Рівняння напруги синхронного явнополюсного генератора має вигляд:

$$U^* = E^* + E_{ad}^* + E_{aq}^* + E_{\sigma a}^* - I^* \cdot r_a,$$

де $E_{\sigma a}^* = -jx_{\sigma a} \cdot I = -jx_{\sigma a} \cdot I_d^* - jx_{\sigma a} \cdot I_q^*$ - ЕРС розсіювання фази обмотки якоря ;
 x_{ad} - індуктивний опір розсіювання фази обмотки якоря.

Використовуючи векторну діаграму ЕРС побудуємо векторну діаграму напруги генератора при активно-індуктивному навантаженні, підсумувавши з вектором E_{σ}^* вектори падінь напруги на активному ($-I^* \cdot r_a$) і індуктивному ($-jI^* \cdot x_{\sigma d}$) опорах фази обмотки якоря. Кут θ^* між E^* і U^* називається кутом навантаження. У генераторному режимі роботи E^* випереджає U^* , і кут θ^* має завжди позитивне значення, машина віддає активну потужність в мережу.

Провівши перетворення, отримаємо E_d^* і E_q^* :

$$E_d^* = E_{ad}^* + E_{\sigma ad}^* = -jI_d^* \cdot (x_{ad} + x_{\sigma a}) = -jI_d^* \cdot x_d,$$

$$E_q^* = E_{aq}^* + E_{\sigma aq}^* = -jI_q^* \cdot (x_{aq} + x_{\sigma a}) = -jI_q^* \cdot x_q,$$

де $x_d = x_{ad} + x_{\sigma a}$, $x_q = x_{aq} + x_{\sigma a}$ - поздовжній і поперечний синхронні індуктивні опори фази обмотки якоря. Векторна діаграма напруг для явнополюсної (а) і неявнополюсної (б) синхронної машини представлена на рис. 3.1

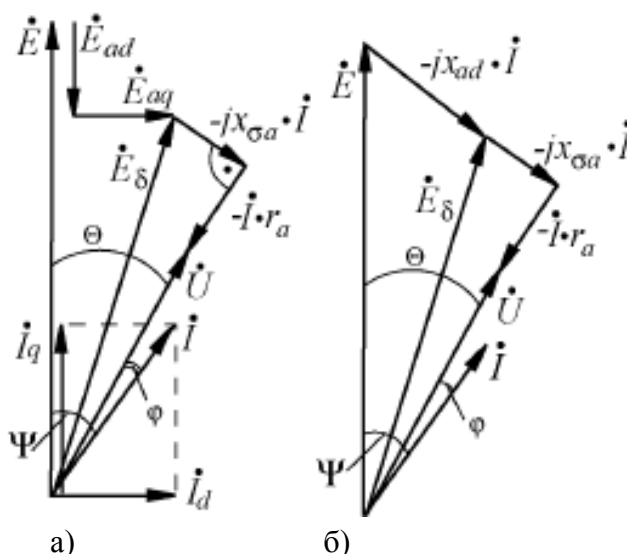


Рис. 3.1 Векторна діаграма напруг для явнополюсної (а) і неявнополюсної (б) синхронної машини

Неявнополюсна машина. Внаслідок рівномірності повітряного зазору, $x_{ad} = x_{aq}$, $x_d = x_q$, тому немає необхідності розкладати струм якоря на складові I_d^* і I_q^* . Рівняння напруги неявнополюсного генератора має наступний вигляд:

$$U^* = E^* - jI^* \cdot x_{ad} - jI^* \cdot x_{\sigma a} - r_a \cdot I^* = E^* - jI^* \cdot x_d - r_a \cdot I^*.$$

Побудову векторної діаграми неявнополюсного генератора здійснюється наступним чином. З вектором E^* підсумуємо вектори падінь напруги на синхронному індуктивному опорі $-jI \cdot x_d = -j(x_{ad} + x_{\sigma a}) \cdot I^*$ і активному опорі $(-r_a \cdot I^*)$ фази обмотки якоря (рис.1.8).

Задачі:

3.1 Визначити E_{fN}^* , θ_N , ψ_N за даними таблиці 3.1, якщо з'єднання фаз У. Прийняти $r_a = 0$. Побудувати діаграму напруг.

Таблиця 3.1

Величина Варіант	S_H , мВ · А	P_H , Вт	$\cos \varphi_H$	I_H , кА	$x_{\sigma a}$, Ом	x_{ad} , Ом	x_{aq} , Ом
1	90	-	0,8	3,76	0,39	1,89	1,125
2	-	40	0,8	2,75	0,35	2,5	1,55
3	4,38	-	0,8	0,402	1,06	13,8	13,8
4	-	6	0,8	0,413	1,8	2,3	2,3

3.2 За даними таблиці 3.2 побудувати діаграму напруг і визначити E_f^* , θ , ψ , якщо $U^* = 1$. Прийняти $r_a = 0$.

Таблиця 3.2

Варіант Величина	1	2	3	4	5	6
I^*	0,5	0,5	1	1	1	1
$\cos\varphi$	0 (C)	0 (L)	0,707 (R-C)	0,707 (R-L)	0,707 (R-C)	0,707 (R-L)
x_d^*	2	2	1,5	1,2	1	0,8
x_q^*	2	2	1,5	1,2	0,6	0,5

3.3 За даними таблиці 3.3 побудувати діаграму напруг і визначити $E_{f\infty}^*$, якщо $U^* = I^* = 1$. Прийняти $r_a = 0$.

Таблиця 3.3

Варіант Величина	1	2	3	4	5
$\cos\varphi$	1 (R)	0 (L)	0,8 (R-L)	0,8 (R-C)	0 (C)
x_d^*	2	1,5	0,84	1	0,8
x_q^*	2	1,5	0,45	0,6	0,5

3.4 Визначити θ , φ , ψ турбогенератора за даними таблиці 3.4, якщо $U^* = I^* = 1$. Побудувати діаграму напруг. Прийняти $r_a = 0$.

Таблиця 3.4

Варіант Величина	1	2	3	4
E_f^*	2,2	2,6	0,8	1,2
x_d^*	1,6	1,6	1,28	1,2

3.5 Визначити θ , φ , ψ турбогенератора за даними табл. 3.5, якщо $I = I_H$ і $r_a = 0$.

Таблиця 3.5

Величина Варіант	U_n , кВ	E_f , кВ	x_{ad}^*	x_{aq}^*	Ψ , град	$x_{\sigma a}^*$
1	0,525	0,7	0,84	0,45	42	0,16
2	6,6	6,2	0,76	0,4	50	0,15
3	0,4	0,44	1,37	1,37	53	0,2
4	6,3	7,2	0,9	0,9	48	0,18

- 3.6 Визначити величину реактивної потужності в МВА, яку може генерувати генератор у мережу при відсутності активної складової та $U^* = 1$. Необхідні дані наведено в таблиці 3.6. Прийняти $r_a = 0$.

Таблиця 3.6

Величина Варіант	1	2	3	4	5
E_f^*	2	0,5	1	1,8	2
x_d^*	1,5	2,66	2	0,8	1
S_n , МВ · А	50	3	100	5	40

- 3.7 Визначити напругу на обмотці якоря турбогенератора після відключення його від мережі, якщо перед відключенням турбогенератор працював при $U^* = U_c^* = 1$, $I^* = 1$, $x_d^* = 1$ та $\cos\varphi = 1$ (R); 0 (L); 0 (C). Зміною швидкості, насиченням та r_a знехтувати.
- 3.8 Для турбогенератора за даними таблиці 3.7 визначити E_δ^* і кут між E_δ та U , якщо $U^* = I^* = 1$.

Таблиця 3.7

Величина Варіант	$\cos\varphi$	x_p^*	r_a^*
1	0,8 (R-L)	0,21	0
2	0,8 (R-C)	0,19	0
3	0,8 (R-L)	0,21	0,0175

- 3.9 Побудувати діаграму Потьє та визначити i_f^* , що забезпечує заданий в таблиці 3.8 режим роботи при $U^* = I^* = 1$ турбогенератора. Використовувати нормальну х.х.х., прийняти $r_a = 0$.

Таблиця 3.8

Величина Варіант	$\cos\varphi$	x_p^*	w	$k_{об}$	w_f	k_d
1	0,8	0,12	180	0,94	150	0,94
2	1	0,16	300	0,94	300	1
3	0	0,128	500	0,93	250	1,04

3.10 При випробуванні трифазного турбогенератора потужністю $S_H = 30 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_{лн} = 11 \text{ кВ}$, $I_H = 1,57 \text{ кА}$, $\cos\varphi_H = 0,8$, $n_H = 3000 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$, $f_1 = 50 \text{ Гц}$, з'єднання фаз “зіркою” були отримані наступні дані:

1) х.х.х. при $n = 3000 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$.

$E_{лf}, \text{кВ}$	4	8	11	13	14	15	16
$i_f, \text{А}$	44	90	131	170	210	280	430

2) х.к.з (трифазне): $I_{л} = 5,84i_f$;

3) $E_{\delta} = 1,8 \text{ кВ}$ при I_H ;

4) $r_a = 0,008 \text{ Ом}$ (в гарячому стані). Побудувати діаграми Потьє і визначити:

а) струми збудження при навантаженнях:

- $30 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_{лн} = 11 \text{ кВ}$, $\cos\varphi_N = 0,8 \text{ (R-L)}$;
- $30 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_{лн} = 11 \text{ кВ}$, $\cos\varphi_N = 1 \text{ (R)}$;
- $30 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_{лн} = 11 \text{ кВ}$, $\cos\varphi_N = 0,7 \text{ (R-C)}$.

б) збільшення напруги при скиданні цих навантажень (відключення від мережі).

3.11 Найбільший струм збудження, що допустимий для тривалої роботи за умовами нагрівання ротора, для турбогенератора, що вказано в задачі 3.10, дорівнює $i_f = 390 \text{ А}$. Визначити найменшу величину $\cos\varphi$, при якій можлива тривала робота машини при індуктивному навантаженні та номінальних U та I . Визначити усталений струм трифазного короткого замикання при найбільшому струмі збудження.

3.12 Визначити графічну величину напруги на затискачах турбогенератора після скидання навантаження (відключення від мережі), якщо відомі: нормальна х.х.х. і параметри, наведені в таблиці 3.9. Прийняти $r_a = 0$.

Таблиця 3.9

Величина Варіант	U^*	I^*	$\cos\varphi$	$x_{\sigma a}^*$	$x_{d\infty}^*$
1	1	1	0,85	0,15	1,8
2	1	1	0,8	0,2	1,5

3.13 Визначити i_f^* , E_f^* , $E_{f\infty}^*$ турбогенератора при $U^* = I^* = 1$, якщо відомі: зміна напруги при відключенні від мережі і параметри, вказані в таблиці 3.10. Використовувати нормальну х.х.х., прийняти $r_a = 0$.

Таблиця 3.10

Величина Варіант	$\cos\varphi$	$x_{\sigma a}^*$	ΔU^*
1	0,8	0,12	0,4
2	1	0,08	0,3
3	0 (L)	0,15	0,35

3.14 Визначити x_d^* , $x_{d\infty}^*$, E_f^* , $E_{f\infty}^*$ для номінального режиму роботи турбогенераторів, якщо задані рівняння прямолінійної частини $E_{f\infty}^* = 1.16i_f^*$ і спрямленої насиченої х.х.х. $E_{f\infty}^* = f(i_f^*)$, а також дані, вказані в таблиці 3.11. Прийняти $r_a = 0$.

Таблиця 3.11

Величина Варіант	$\cos\varphi_H$	x_p^*	$k_{id}I^*$	E_f^*
1	0,85	0,15	1,57	0,885
2	0,8	0,12	1,31	0,918
3	1	0,16	1,4	0,843

3.15 Знайти величину похибки при визначенні i_f^* , E_f^* , x_{ad}^* для номінального режиму роботи турбогенераторів, якщо прийняти, що $E_\delta = U_H$. Необхідні дані для розрахунку вказані в таблиці 3.12. Використовувати нормальну х.х.х.

Таблиця 3.12

Величина Варіант	x_p^*	$\cos\varphi_H$	K_{id}
1	0,16	0,8 (R-L)	1,4
2	0,16	0,8 (R-C)	1,4
3	0,16	1	1,4

- 3.16 Для турбогенератора задано повний струм збудження i_f^* , рівняння $E_{f\infty}^* = f(i_f^*)$ спрямленої насиченої х.х.х, і величини, що визначають режим роботи машини (табл. 3.13). Визначити k_{id} та x_{ad}^* . Прийняти $r_a = 0$.

Таблиця 3.13

Величина Варіант	U^*	I^*	$\cos\varphi$	i_f^*	E_f^*	x_p^*
1	1	1	0,8 (R-L)	2,1	$1,11 \cdot i_f^*$	0,16
2	1	1	1	1,67	i_f^*	0,16
3	1	1	0,8 (R-C)	0,79	$1,11 \cdot i_f^*$	0,16

- 3.17 В таблиці 3.14 приведена навантажувальна характеристика генератора в абсолютних одиницях. Записати характеристику у відносних одиницях, якщо відомо, що $BKЗ = 1,12$ та $U_{лн} = 6,3$ кВ.

Таблиця 3.14

$U_{лн}, \text{кВ}$	0	3,15	5,35	6,3	6,95	7,23
$i_f, \text{А}$	82	130	182	226	270	330

- 3.18 Побудувати зовнішню характеристику генератора по відомій зовнішній характеристиці (табл.3.15) у відсотках при $\cos\varphi$, що менший за номінальний, якщо відомо, що $U_{лн} = 3,15$ кВ, $\cos\varphi_{н} = 0,8$, $P_{н} = 6000$ кВт.

Таблиця 3.15

$U, \%$	100	98	95	93	91	89	86	82	78,5	73
$I, \%$	0	20	30	40	50	60	70	80	90	100

- 3.19 Побудувати спрямлені зовнішні характеристики генератора, що працює окремо від інших генераторів, та скласти для них рівняння $U = f(I)$ якщо відомі: номінальні зміни напруги на затискачах генератора та $\cos\varphi$ (табл. 3.16).

Таблиця 3.16

Величина Варіант	1	2	3
$\cos\varphi_{н}$	0,8 (R-L)	0,8 (R-C)	1
$\Delta U_{н}^*$	0,35	0,15	0,1

3.20 Побудувати спрямлені зовнішні характеристики турбогенераторів, що працюють окремо від інших генераторів, при $\cos \varphi_H = 0,8 (R - L)$; $\cos \varphi_H = 0,8 (R - C)$; $\cos \varphi_H = 1 (R)$. Використати діаграму Потьє, нормальну х.х.х і дані табл. 3.17. Прийняти $r_a = 0$.

Таблиця 3.17

Величина \ Варіант	1	2	3
x_{ra}^*	0,13	0,14	0,15
I_k^*	1,39	1,33	0,7

3.21 Побувати спрямлені регульовальні характеристики турбогенератора і написати для них рівняння $i_f^* = f(I^*)$ за даними табл. 3.18.

Таблиця 3.18

Величина \ Варіант	1	2	3
$\cos \varphi_H$	0,8 (R-L)	0,8 (R-C)	1
ΔU_H^*	0,25	0,08	0,2

3.22 Турбогенератори мають нормальні х.х.х. Дані турбогенераторів у в.о. приведені в табл. 3.19. Приймаючи $r_a = 0$, побудувати х.к.з. трьох фаз. Визначити намагнічуючу силу, яка йде на компенсацію реакції якоря при номінальному навантаженні. Побудувати діаграму Потьє і визначити номінальне значення напруги. Розрахувати і побудувати регульовальну характеристику при $\cos \varphi = 0,8(R - L)$; $U^* = I^* = 1$.

Таблиця 3.19

Величина \ Варіант	1	2	3	4	5	6
$\cos \varphi_H$	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
$x_{\sigma a}^*$	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17
x_d^*	1,2	1,3	1,4	1,5	1,4	1,2

4. Паралельна робота синхронних генераторів

Теоретичні відомості і формули [11]:

На кожній електричній станції зазвичай встановлено кілька генераторів, які включаються на паралельну роботу. У сучасних енергосистемах на паралельну роботу включено цілий ряд електростанцій, чим досягається висока надійність енергопостачання споживачів, можливість маневрування енергоресурсами.

Умови включення генераторів на паралельну роботу

Необхідно виконати наступні вимоги:

1. ЕРС генератора, що вмикається E_G повинна дорівнювати напрузі мережі U_c ;
2. Частота генератора f_G повинна бути рівною частоті мережі f_c ;
3. E_G і U_c повинні бути у фазі;
4. Чергування фаз генератора і мережі повинні бути однаковими.

За зазначених умов вектори ЕРС генератора та напруг мережі збігаються і обертаються з однаковою частотою (рис.4.1), різниці ЕРС і напруг між однойменними контактами вимикача при включенні генератора дорівнюють нулю

$$E_{GA}^* - U_{CA}^* = E_{GB}^* - U_{CB}^* = E_{GC}^* - U_{CC}^* = 0.$$

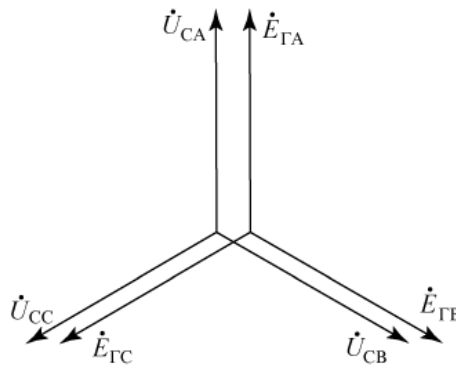


Рис. 4.1 Вектори ЕРС генератора та напруг мережі при виконанні всіх умов включення генератора на паралельну роботу.

Рівність ЕРС і напруг досягається шляхом регулювання струму збудження генератора, а контролюється за допомогою вольтметра (на малюнку відсутній). Зміна частоти і фази ЕРС генератора досягається зміною частоти обертання ротора генератора. Правильність чергування фаз перевіряється тільки при першому включенні генератора. Співпадання ЕРС і напруг по фазі контролюється за допомогою ламп, нульових вольтметрів або спеціальних синхроноскопів.

Неправильна синхронізація може викликати серйозну аварію.

Формули [4]:

Максимум електромагнітної потужності має місце при $\theta = 90^\circ$:

$$P_{\text{еп max}} = mU \frac{E_0}{x_c}$$

і відповідно максимальний електромагнітний момент

$$M_{\text{еп max}} = \frac{mU}{\omega_c} \cdot \frac{E_0}{x_c}.$$

Максимальна електромагнітна потужність $P_{\text{еп max}}$ визначає границю статичної стійкості машини, тобто її здатність залишатись в синхронізмі. Збільшення навантаження за межами статичної стійкості приводить до випадання машини з синхронізму.

Питома синхронізуюча потужність:

$$P_c = mU \cdot \frac{E_0}{x_c} \cdot \cos \theta.$$

Синхронізуюча потужність максимальна, якщо $P_{\text{ем}} = 0$. Якщо машина знаходиться на границі статичної стійкості, тобто електромагнітна потужність рівна своєму максимальному значенню, $P_c = 0$.

Номінальне навантаження синхронних генераторів зазвичай розраховується при $\theta \approx 20 \div 30^\circ$. Тому короткочасно машина може працювати при 1,5-2- кратному збільшенні навантаження, не випадаючи із синхронізму. Відношення $\frac{P_{\text{еп max}}}{P_{\text{еп, ном}}}$ називається статична перевантаженість синхронної машини. Статична перевантаженість:

$$k_{\text{п}} = \frac{P_{\text{еп max}}}{P_{\text{еп, ном}}} = \frac{m \cdot U_{\text{ном}} \cdot \frac{E_0}{x_d}}{m \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}} = \text{OKЗ} \frac{I_{f \text{ ном}}}{I_{f0} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}},$$

де, $\frac{E_0}{x_d} = I_{\text{к, ном}}$.

Зарядна потужність:

$$S_3 = mU_{\text{ном}} \cdot I_3 = \frac{m \cdot U_{\text{ном}}^2}{x_d},$$

де, I_3 - зарядний струм, створюючий при роботі на ємнісне навантаження, при відключеній обмотці збудження, номінальну напругу на виводах генератора.

Приклади розв'язків задач:

До задачі 4.6. Варіант 1. При $r_a \approx 0$ потужність СГ на затискачах:

$$P = \frac{m \cdot U_{\text{н}} \cdot E_f}{x_d} \cdot \sin \theta_n = \frac{m \cdot U_{\text{н}} \cdot E_f \cdot I_{\text{н}}}{x_d^*} \cdot \sin \theta_n = \frac{m \cdot \frac{E_{f\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot I_{\text{н}}}{x_d^*} \cdot \sin \theta_n$$

$$I_{\text{н}} = \frac{S_{\text{н}}}{m \cdot \frac{U_{\text{нл}}}{\sqrt{3}}} = \frac{1240000 \cdot \sqrt{3}}{3 \cdot 400} = 1802 \text{ А.}$$

$$P = \frac{3 \cdot 700 \cdot 1802 \cdot 0,5}{\sqrt{3} \cdot 1,56} = 658855 \text{ Вт.}$$

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{658855}{0,93} = 708446 \text{ Вт.}$$

До задачі 4.7. Реактивна потужність у відносних одиницях (при $r_a = 0$):

$$\theta^* = \frac{U^* \cdot E_f \cdot \cos \theta}{x_d^*} - \frac{(U^* \cdot \cos \theta)^2}{x_d^*} - \frac{(U^* \cdot \cos \theta)^2}{x_q^*}$$

Розв'язання **варіанту 1**: оскільки згідно умові $E_f = 0$ то машина без збудження та $\theta_{\text{max}} = 45^\circ$ тоді

$$\bar{\theta} = \frac{(U^* \cdot \cos\theta)^2}{x_d^*} - \frac{(U^* \cdot \cos\theta)^2}{x_q^*} = \frac{(1 \cdot \cos 45)^2}{1,1} - \frac{(1 \cdot \sin 45)^2}{0,75}$$

$$= \left[\frac{\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2}{1,1} - \frac{\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2}{0,75} \right] = -j 1,121$$

Активна потужність: $P^* = \frac{U^{*2}}{2} \cdot \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{0,75} - \frac{1}{1,1} \right) = 0,212$

Варіант 2:

$$Q = \frac{1 \cdot 2 \cdot \sqrt{2}}{0,9 \cdot 2} - \frac{2}{4 \cdot 0,9} - \frac{2}{4 \cdot 0,55} = \frac{\sqrt{2}}{0,9} - \frac{1}{1,8} - \frac{1}{1,1} = j 0,102$$

$$P^* = \frac{U^* \cdot E_f^*}{x_d^*} \cdot \sin\theta + \frac{U^{*2}}{2} \cdot \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot \sin 2\theta = \frac{2}{0,9} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{0,55} - \frac{1}{0,9} \right)$$

$$= 1,566 + 0,353 = 1,919$$

До задачі 4.9. Варіант 1. Згідно умови $Q = P$:

$$\frac{U^* \cdot E_f^* \cos\theta}{x_d} - \frac{(U^* \cos\theta)^2}{x_d} - \frac{(U^* \cos\theta)^2}{x_q} = \frac{U^* \cdot E_f^*}{x_d} \cdot \sin\theta.$$

$$x_d = x_q, \text{ тоді } E_f^* \cdot \cos\theta - U^* \cdot (\cos^2\theta + \sin^2\theta) = E_f^* \cdot \cos\theta;$$

$$E_f^* \cdot \cos\theta - U^* = E_f^* \cdot \sin\theta$$

$$2,06 \cdot \cos\theta - 2,06 \cdot \sin\theta - 1 = 0;$$

$$2,06 \cdot (\cos\theta - \sin\theta) - 1 = 0;$$

$$[2,06 \cdot (\cos\theta - \sin\theta)]^2 = [1]^2$$

$$4,24 \cdot (\cos^2\theta + \sin^2\theta - 2 \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta) = 1;$$

$$4,24 \cdot (1 - \sin 2\theta) = 1;$$

$$\sin 2\theta = 1 - \frac{1}{4,24} = 0,7642;$$

$$2\theta = 49,5 \approx 50^\circ$$

$$\theta = 25^\circ.$$

До задачі 4.10. Варіант 1. Згідно умови $Q = 1$ та

$$E_f^* \cdot \cos\theta - \cos^2\theta - \sin^2\theta = E_f^* \cdot \sin\theta$$

$$E_f^* \cdot \cos\theta - 1 - E_f^* \cdot \sin\theta = 0;$$

$$E_f^* \cdot (\cos\theta - \sin\theta) = 1;$$

$$E_f^{*2} \cdot (\cos^2\theta - \sin^2\theta - 2 \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta) = 1;$$

$$1 - 2 \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta = \frac{1}{E_f^{*2}};$$

$$1 - \sin 2\theta = \frac{1}{E_f^{*2}};$$

$$i_f^* = \frac{1}{1 - \sin 2\theta}$$

До задачі 4.11. Варіант 1. $k_H = \frac{E_{fH}^*}{x_d^* \cdot \cos \varphi_H}$.

Вважаючи $E_f^* = i_f^*$,

$$k_H = \frac{2,3}{1,3 \cdot 0,8} = 2,21$$

$$\sin \theta_H = \frac{1}{k_H} = \frac{1}{2,21} = 0,452$$

$$\theta_H = 26^{\circ}40'.$$

До задачі 4.12.

Варіант 1

$$k_m = \frac{1}{\sin \theta_H} = \frac{1}{\sin 25^{\circ}} = 2,366$$

$$k_m = \frac{E_f^*}{x_d^*} \cdot \frac{1}{\cos \varphi_H} \quad (1)$$

З режиму трифазного к.з. відомо $x_d^* \cdot I_d^* = E_{fk}^*$

Якщо $I_a^* = I_H^* = 1$, то можна записати $E_{fk}^* = x_d^* \cdot I_H^* = x_d^*$,

тому замість (1) можна записати:

$$k_m = \frac{E_{fH}^*}{E_{fk}^*} \cdot \frac{1}{\cos \varphi_H} \quad (2)$$

де E_{fk}^* - ЕРС, що індукується струмом збудження $i_f^* = i_{fk}^*$ при усталеному трифазному к.з., коли струм к.з. дорівнює I_H . Оскільки ЕРС E_{fH}^* і E_{fk}^* пропорційні i_{fH}^* та i_{fk}^* ([1] стор.724) то:

$$k_m = \frac{i_{fH}^*}{i_{fk}^*} \cdot \frac{1}{\cos \varphi_H} \quad (3)$$

Тут i_{fH}^* – струм збудження, який викликає у статорі при короткому замиканні нелінійний струм і зважаючи на лінійний характер характеристики короткого замикання $i_{fk}^* \equiv I_H^*$, тобто:

$$k_m = \frac{i_{fH}^*}{I_H^*} \cdot \frac{1}{\cos \varphi_H} \quad (4)$$

Згідно умови $I_k^* = 0,5$, тому щоб (2)-(4) були справедливими слід писати:

$$k_m = \frac{i_{fH}^*}{2 \cdot I_k^*} \cdot \frac{1}{\cos \varphi_H},$$

Звідси $i_{fH}^* = k_m \cdot 2 \cdot I_k^* \cdot \cos \varphi_H = 2,366 \cdot 2 \cdot 0,5 \cdot 0,8 = 1,8928$

Варіант 3

Тут $I_k^* = 0,8$ тому:

$$k_m = \frac{i_{fH}^*}{1,25 \cdot I_k^*} \cdot \frac{1}{\cos \varphi_H}$$

$$k_m = \frac{1}{\sin \theta_H} = \frac{1}{\sin 20^\circ} = 2,923$$

$$i_{fH}^* = k_m \cdot 1,25 \cdot I_k^* \cdot \cos \varphi_H = 2,923 \cdot 1,25 \cdot 0,8 \cdot 0,8 = 2,338$$

Задачі:

- 4.1 Генератор підключений на паралельну роботу із потужною мережею. Після синхронізації був змінений струм збудження генератора. Приймавши $E_\sigma^* = U_H^* = U_M^* = 1$, визначити за даними табл. 4.1 E_σ^* , I^* і потужність генератора в абсолютних одиницях. Побудувати діаграму напруг.

Таблиця 4.1

Величина Варіант	S_H , МВА	x_d^*	x_q^*	i_f^*
1	117,2	2	2	1,2
2	120	1,87	1,87	0,7
3	25	1,15	0,72	1,3
4	20	1	0,6	0,6

- 4.2 Генератор підключений на паралельну роботу із потужною мережею. Після синхронізації змінився обертовий момент приводного двигуна. Приймавши $E_\sigma^* = U_H^* = U_M^* = 1$, визначити I^* , P та Q в абсолютних одиницях за даними табл. 4.2. Побудувати діаграму напруг.

Таблиця 4.2

Величина Варіант	S_H , МВА	x_d^*	x_q^*	θ , град
1	1,25	1,47	1,47	20
2	1,5	1,45	1,45	-20
3	68,75	0,725	0,55	15
4	18	1	0,53	-15

- 4.3 Генератор підключений на паралельну роботу із потужною мережею. Визначити величину і знак складових повної потужності по даним табл. 4.3,

якщо після синхронізації: а) спочатку збільшений момент приводного двигуна, потім змінений струм збудження; б) у зворотному напрямку, ніж у пункті “а”. Прийняти $E_{\sigma}^* = U_H^* = U_M^* = 1$.

Таблиця 4.3

Величина Варіант	S_H , МВА	i_f^*	θ , град	x_d^*	x_q^*
1	15	1,2	30	1,86	1,86
2	15	0,7	30	2,1	2,1
3	7	1,2	30	0,9	0,55
4	25	0,7	30	1,15	0,72

4.4 Генератор підключений на паралельну роботу із потужною мережею. Визначити залежність $i_f^* = f(\theta)$ при умові постійності $\cos \varphi = 1$, прийнявши $E_{\sigma}^* = U_H^* = U_M^* = 1$. Визначити також θ_H за даними табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Величина Варіант	1	2	3	4
x_d^*	1,55	2,32	0,9	1
x_q^*	1,55	2,32	0,55	0,6

4.5 За даними табл. 4.5 визначити P^* , Q^* та θ для турбогенератора, що працює на потужну мережу в номінальному режимі.

Таблиця 4.5

Величина Варіант	x_p^*	$E_{\sigma H}^*$	k_{id}	i_{fH}^*	k_H
1	0,15	0,917	1,3	2,3	1,95
2	0,19	0,904	2,1	2,95	1,7
3	0,14	0,925	1,9	2,86	1,74
4	0,12	0,932	1,7	2,64	1,83

4.6 Генератори працюють на потужну мережу із $f_1 = 50$ Гц. За даними табл. 4.6 визначити потужність, споживану від первинного двигуна, а також гальмівний момент генераторів, якщо фази обмотки статора з'єднані в “зірку”.

Таблиця 4.6

Величина Варіант	E_f , кВ	U_m , кВ	x_d^*	x_q^*	θ , град	n_n , об/хв	S_n , МВА	U_n , кВ	η , %
1	0,7	0,38	1,66	1,66	30	3000	1,25	0,4	93
2	9,3	6,3	1,6	1,6	20	3000	7,5	6,3	94
3	9,3	6,25	1,92	1,92	30	3000	3,125	6,3	95
4	9,6	6,3	1,02	0,6	15	250	10	6,6	95
5	9,4	6,3	0,91	0,55	15	250	4	6,6	94

4.7 За даними табл. 4.7 визначити складові у в.о. повної потужності для $\theta = \theta_{кр}$ генератора, що працює на потужну мережу при $U^* = 1$.

Таблиця 4.7

Величина Варіант	x_d^*	x_q^*	E_f^*
1	1,1	0,75	0
2	0,9	0,55	2
3	0,95	0,59	0,5
4	1,3	1,3	2,12

4.8 За даними табл. 4.8. визначити коефіцієнти синхронізуючої потужності і моменту у в.о. генераторів, що працюють паралельно із потужною мережею при $U^* = 1$.

Таблиця 4.8

Величина Варіант	x_d^*	x_q^*	E_f^*	θ , град
1	1,15	0,72	0	15
2	1,05	0,61	2	20
3	0,725	0,55	0,5	25
4	1,7	1,7	2, 2	30

4.9 Турбогенератор працює паралельно із потужною мережею при $U^* = 1$. Визначити кут потужності, при якому активна і реактивна потужності турбогенератора є рівними за величиною, якщо $E_f^* = 2,06; 1,2; 0,8; 1$.

4.10 Турбогенератор працює паралельно із потужною мережею при $U^* = 1$. Приймаючи, що $E_\sigma^* = U_n^* = U_m^* = 1$, визначити закон регулювання $i_f^* = f(\theta)$ при умові рівності за величиною складових повної потужності турбогенератора.

4.11 За даними табл. 4.9 визначити для турбогенератора величини k_n, θ_n .

Таблиця 4.9

Величина Варіант	$\cos \varphi_n$	i_{fn}^*	x_d^* при $E_\sigma = U_n$
1	0,8	2,3	1,3
2	0,8	2,95	2,1
3	0,8	2,86	1,9
4	0,8	2,64	1,7

4.12 Турбогенератори працюють паралельно із мережею в номінальному режимі роботи. Визначити i_{fn}^* за даними табл. 4.10.

Таблиця 4.10

Величина Варіант	θ_n , град	I_k^*	$\cos \varphi_n$
1	25	0,5	0,8
2	30	0,7	0,8
3	20	0,8	0,8

4.13 При номінальному навантаженні трифазного неявнополюсного генератора, підключеного до мережі з параметрами: $U_n = 6,3$ кВ, струм статора $I_\Delta = 57$ А, $\cos \varphi = 0,8$, $\theta_n = 30^\circ$. Визначити величину E_f в цьому режимі, активну потужність, що віддається генератором в мережу і його статичне перевантаження, якщо $x_d^* = 1,3$. Фази статора з'єднані в "зірку".

4.14 Генератор працює із навантаженням $P_2 = 5$ кВт. Визначити підведену до валу потужність P_1 , сумарні втрати і ККД генератора, якщо при збільшенні

його навантаження на 1 кВт ККД зросте на 2%, а загальні втрати складають 0,5 кВт.

- 4.15 Визначити I_H та $\cos \varphi_H$ турбогенератора потужністю 2500 кВт, підключеного до мережі із напругою 6,3 кВ, якщо відомо, що $BKЗ = 0,915$, $x_d = 41,5$ Ом і фази обмотки статора з'єднані в “трикутник”.
- 4.16 Визначити P_H трифазного генератора, що працює паралельно із мережею, якщо відомо, що $U_{лн} = 400$ В, $BKЗ = 0,635$, $x_d = 0,2$ Ом, $\cos \varphi = 0,8$, фази обмотки статора з'єднані в “зірку”.
- 4.17 Генератори працюють паралельно із потужною мережею. Приймаючи, що $E_\sigma^* = U_H^* = U_M^* = const$, за даними табл. 4.11 скласти рівняння гілок V-подібної характеристики у в.о. для значень активної складової струму якоря $I_a^* = 0,5; 1$.

Таблиця 4.11

Величина \ Варіант	1	2	3	4
k_{id}	1,2	1,6	0,82	0,8
k_{iq}	1,2	1,6	0,43	0,42

- 4.18 Синхронні генератори працюють паралельно із потужною мережею при $U^* = 1$. Приймаючи $r_a = 0$, за даними табл. 4.12 і нормальної х.х.х побудувати V – подібні характеристики у в.о. для $I_a^* = 0; 0,5$ при значеннях реактивної складової струму якоря $I_p^* = 0,5; 0,75; 1$ для $i_f^* < 1$ та $I_p^* = 0,5; 0,75; 1; 1,25$ для $i_f^* > 1$.

Таблиця 4.12

Величина \ Варіант	1	2	3	4
$x_{\sigma a}^*$	0,14	0,12	0,1	0,1
k_{id}	1,3	1,7	0,9	0,8

- 4.19 Турбогенератор працює паралельно із потужною мережею. Приймаючи, що $E_\sigma^* = U_H^* = U_M^* = const$, скласти рівняння границі стійкості $I^* = f(i_f^*)$, на якій $\theta = \theta_{кр}$.

5. Синхронні двигуни і синхронні компенсатори

Теоретичні відомості і формули [11]:

Синхронні двигуни є елементом силового електроприводу, синхронні компенсатори служать для компенсації (вироблення і споживання) реактивної потужності.

Характерними режимами їх роботи в нормальному робочому стані є: режим недозбудження і режим перезбудження. Недозбуджений двигун споживає реактивну потужність; його синхронна E_q , так само як і надперехідна E^{**} , ЕРС менше підведеної напруги U_0 . Перезбуджений синхронний двигун (компенсатор) є джерелом реактивної потужності, що відповідає нерівності $E_q > U_0$ та $E^{**} > U_0$. Векторні діаграми для цих режимів за умови $x_d^{**} = x_q^{**} = x^{**}$, що дозволяє відмовитися від розкладання параметрів по осях d і q , наведено на рис. 5.1. При побудові струми прийняті зі знаком «-», що відповідає руховому режиму.

Початкові значення надперехідного ЕРС E_0^{**} визначаються за параметрами режиму, що передуює короткому замиканню, і відповідно до векторної діаграми обчислюються за формулою

$$E_0^{**} = E_{(0)}^{**} = \sqrt{(U_0 \cdot \cos \varphi)^2 + (U_0 \cdot \sin \varphi \pm I_0 \cdot x^{**})^2}$$

де U_0, I_0, φ_0 - параметри режиму, що передуює КЗ;

знак «-» відповідає режиму перезбудження;

знак «+» - режиму недозбудження.

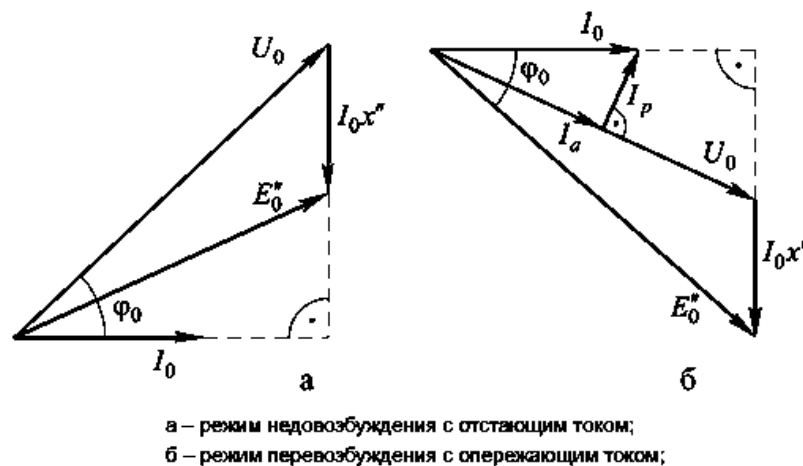


Рис. 5.1 . Векторні діаграми синхронного двигуна

Згідно з функціональним призначенням синхронного компенсатора він споживає незначний активний струм; реактивний струм (I_p) є превалюючим і кут φ_0 близький до $\pm 90^\circ$.

Розглянемо вплив синхронного двигуна навантаження на струм перехідного режиму. У перезбудженого синхронного двигуна (компенсатора) в нормальному робочому стані надперехідна ЕРС завжди вище підведеної напруги ($E_q^{**} > U_0$). При КЗ напруга U_0 знижується до значення $U_{(0)}$, що підсилює цю нерівність і, реактивний струм, що посилюється двигуном в мережу неодмінно зростає, тобто він є додатковим джерелом підживлення місця короткого замикання. Цього не можна сказати відносно синхронного двигуна, що працює в нормальному режимі з недозбудженням, оскільки за цих умов його надперехідна ЕРС менше

підведеної напруги ($E_0^{**} < U_0$). Тут, в залежності від ступеня зниження напруги при КЗ, його вплив неоднозначний. При віддалених коротких замиканнях, тобто незначному зниженні напруги знак нерівності $E_0^{**} < U_0$ зберігається ($E_0^{**} < U_{(0)}$), і двигун продовжує споживати реактивний струм з мережі. При глибокому зниженні напруги, що характерно для близьких КЗ, знак нерівності $E_0^{**} < U_0$ змінюється ($E_0^{**} < U_{(0)}$), і двигун переходить у генераторний режим, посилюючи реактивний струм в аварійну точку.

Формули [4]:

Стійкою частиною кутової характеристики в режимі двигуна являється область від 0 до 90° . Номінальний момент, що відповідає $\theta_{\text{ном}}$, знаходиться в області $20 - 30^\circ$. Двигун з неявно полюсним ротором має максимальний момент при $\theta = -90^\circ$.

$$M_{\text{еп max}} = \frac{P_{\text{еп max}}}{\omega_c} = \frac{mU}{\omega_c} \cdot \frac{E_0}{x_d}.$$

Границя статичної стійкості

$$k_{\Pi} = \frac{M_{\text{еп max}}}{M_{\text{еп ном}}}.$$

Повна номінальна потужність для синхронного компенсатора

$$S_{\text{н}} = m \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}}.$$

Повна потужність при перезбудженні

$$S = m \frac{U_{\text{ном}}^2}{x_d}.$$

Задачі:

- 5.1 Визначити величини $\theta_{\text{н}}$ та $E_{f\text{н}}^*$ якщо відомі параметри номінального режиму та $\cos \varphi_{\text{н}}$ двигуна, зазначені в табл. 5.1. Прийняти $r_a=0$. Побудувати векторну діаграму напруг.

Таблиця 5.1

Варіант Величина	1	2	3	4	5
x_a^*	1,3	1,3	1,3	1,5	1,5
x_q^*	0,8	0,8	1,14	1,5	1,5
$\cos \varphi_{\text{н}}$	0,8 (R-L)	0,8 (R-C)	1 (R)	0,9 (R-L)	0,8 (R-C)

- 5.2 Визначити реактивну потужність у в.о. турбодвигуна, яку він віддає в мережу при зменшенні навантаження на валу, якщо до зменшення навантаження двигун працював у номінальному режимі. Заданими є: нормальна х.х.х. і дані, наведені в табл. 5.2. Знехтувати зміною втрат при зміні навантаження, прийняти $r_a=0$. Побудувати необхідну гілку V-подібної характеристики.

Таблиця 5.2

Величина Варіант	$\cos \varphi_n$	η	$x_{\sigma a}^*$	k_{id}	P_2^*
1	0,8	0,96	0,1	0,8	0,5
2	0,9	0,97	0,1	1,2	0,75
3	1	0,97	0,1	1,3	0,9

5.3 Визначити величину в кВА та знак реактивної потужності турбодвигуна за даними табл. 5.3.

Таблиця 5.3

Величина Варіант	E_f^*	U_m^*	I^*	$P_{2n},$ кВт	η	x_d^*
1	0,8	1	1	800	0,91	0,8
2	1,5	1	1	2000	0,96	1

5.4 Визначити величини M_n Q_n $\cos \varphi_n$ реактивних двигунів за даними табл. 5.4, якщо з'єднання фаз обмотки статора “зірка”. Побудувати векторну діаграму напруг.

Таблиця 5.4

Величина Варіант	$P_{2n},$ кВт	$U_{лн},$ В	η_n	$n_n,$ об\хв	$x_d,$ Ом	$x_q,$ Ом
1	0,1	380	0,8	3000	1260	412
2	0,15	380	0,85	1500	250	90

5.5 Визначити граничне активне навантаження двигуна і споживаний при цьому струм якоря, якщо $i_f = 0$. Побудувати діаграму напруг.

Таблиця 5.5

Величина Варіант	U_m^*	x_d^*	x_q^*
1	1	1,3	0,77
2	1	0,9	0,4
3	1	1	0,66

5.6 Для турбодвигуна визначити величини, які не вказані в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6

Величина Варіант	E_{fH}^*	$\cos \varphi_H$	x_d^*	k_H
1	1,2	0,8	0,8	-
2	-	0,8	1,1	2

- 5.7 Визначити граничну величину реактивної потужності в абсолютних одиницях турбодвигуна, яку він міг би віддавати в мережу без перегріву обмоток якоря та збудження при відсутності навантаження на валу. Заданими є: $U_M^* = 1$, нормальна х.х.х. і дані, наведені в табл. 5.7. Прийняти $r_a = 0$.

Таблиця 5.7

Величина Варіант	P_{2H} , кВт	$\cos \varphi_H$	η_H	$x_{\sigma a}^*$	E_{fH}^*
1	6000	0,9	0,97	0,1	2,1
2	5000	0,8	0,97	0,1	2

- 5.8 Визначити у скільки разів зменшуються сумарні втрати потужності на опорах мережі і генератора при роботі з компенсатором, якщо відомі: потужність навантаження, потужність компенсатора (S_k) та інші величини, зазначені в табл. 5.8.

Таблиця 5.8

Величина Варіант	P_{2H} , кВт	$\cos \varphi_H$	η_H	$x_{\sigma a}^*$	E_{fH}^*
1	2,6+j3	6,3	0,15	0,045	30+j3000
2	4+j3,5	6,3	0,2	0,05	20-j3200

- 5.9 Потужність споживана навантаженням з мережі становить 1500 кВА при $\cos \varphi = 0,7$. Визначити потужність компенсатора необхідного для підвищення $\cos \varphi$ до величини $\cos \varphi' = 0,8; 0,95; 1$. Визначити, також, величину струму в мережі до і після компенсації, якщо $U_M = 6,3$ кВ.

- 5.10 Два генератора несуть однакове навантаження, віддаючи в мережу $I_1 = I_2 = 1000$ А при $\cos \varphi_1' = \cos \varphi_2 = 0,8$. Зміною струму збудження, генераторів і моментів на валу встановлено $\cos \varphi_1 = 1$ при $I_1 = 1000$ А. Як зміниться режим другого генератора, тобто чому дорівнює I_2 і $\cos \varphi_2$, якщо загальне навантаження не змінилось.

5.11 Напруга в кінці лінії передачі $U = 21$ кВ. При навантаженні 2500 кВт і $\cos \varphi = 0,75$ падіння напруги $\Delta U = 1850$ В. Опори лінії: $r_{\text{л}} = 22,4$ Ом, $x_{\text{л}} = 53,1$ Ом. Який потрібен компенсатор, щоб вказане падіння напруги не змінювалося від х.х. до повного навантаження.

5.12 Трифазна система напруги 6,3 кВ з підключеними:

- 1) приймач, що споживає струм $I_{\text{н}} = 1000$ А при $\cos \varphi = 0,6$;
- 2) від приймача віддалена станція 1, що подає струм $I_1 = 400$ А при $\cos \varphi_1 = 1$;
- 3) поблизу приймача знаходиться станція 2, що подає струм $I_2 = 250$ А $\cos \varphi_2 = 0,8$;
- 4) компенсатор, що подає необхідну приймачу реактивну потужність.

Визначити споживану від компенсатора потужність.

5.13 Визначити найбільші струм і потужність компенсатора в режимі недозбудження, якщо задано: $S_{\text{н}} = 15000$ кВА, $I_{\text{н}} = 825$ А, $x_d^* = 1,8$, з'єднання фаз “зірка”.

5.14 Визначити найбільшу можливу потужність компенсатора в режимі недозбудження і при від'ємному збудженні у в.о., якщо відомо: $x_d^* = 1,5$ $x_q^* = 0,9$.

5.15 Визначити початковий пусковий і вхідний моменти компенсатора при прямому асинхронному пуску, якщо при пуску обмотка збудження:

- 1) закорочена,
- 2) замкнута на додатковий опір $r_d^* = 0,118$.

Задано: $S_{\text{н}} = 30$ МВА, $U_{\text{н}} = 11$ кВ, $x_{ra}^* = 0,129$, $x_{ad}^* = 1,4$, $x_{aq}^* = 0,8$, $r_f^* = 0,00236$, $x_{\sigma f}^* = 0,31$ $x_{\sigma yd}^* = 0,11$, $x_{\sigma yq}^* = 0,09$, $f_1 = 50$ Гц, $p = 3$, з'єднання фаз “зірка”.

6 Перехідні процеси, коливання і несиметричні режими синхронних машин

Теоретичні відомості і формули [6]:

При різких змінах режиму роботи синхронної машини (підключення і відключення навантаження, замикання і розмикання електричних ланцюгів обмоток, коротке замикання і т.д.) виникають різноманітні перехідні процеси. Перехідні процеси в одній машині можуть надати великий вплив на інші машини, що працюють в єдиній енергосистемі, і викликати серйозні аварії з великими збитками.

Перехідні процеси будь-якого характеру описуються диференціальними рівняннями. Явнополюсні синхронні машини мають магнітну і електричну несиметрію, їх диференціальні рівняння мають складний вид. Найбільш інтенсивні перехідні процеси в синхронних машинах викликаються короткими замиканнями, які відбуваються з різних причин (пошкодження і пробой ізоляції, падіння опор ліній електропередачі, обрив проводів і т.д.). Короткі замикання, які виникають при роботі електричних машин під напругою, називаються раптовими.

Формули [4]:

Надперехідні опори:

$$x_d'' = \frac{U}{2I_{max}};$$

$$x_q'' = \frac{U}{2I_{min}};$$

При повороті ротора вісь поля поперемінно збігається з продольною і поперечною осями машини і струм визначається опором по поздовжній і поперечній осі машини.

В машині без демпферної обмотки таким чином визначається x_d' та x_q' .

Ударне значення струму для синхронної машини з демпферною обмоткою:

$$I_{уд} = 1,8 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot 1,05 U_{ном}}{x_d''},$$

для машин без демпферної обмотки

$$I_{уд} = 1,8 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot 1,05 U_{ном}}{x_d'}.$$

Також інколи вводять поняття кратності ударного струму

$$k_{уд} = \frac{I_{уд}}{\sqrt{2} I_{ном}}.$$

Постійна часу для обмотки якоря для середнього значення x_d'' та x_q''

$$T_a = \frac{x_d'' + x_q''}{2\omega r_a},$$

при відсутності демпферної обмотки

$$T_a = \frac{x_d' + x_q'}{2\omega r_a}.$$

Ударні моменти

$$M_k = M_{k0} e^{\frac{-t}{T_m}} \cdot \sin \omega t,$$

де T_m - постійна часу, що визначає затухання ударного моменту, залежить від постійної часу обмотки збудження і обмотки якоря.

Приклади розв'язків задач:

До задачі 6.2

Варіант 1

$$I_{нм}^{*''} = \frac{E_m^*}{x_d''} - \frac{E_m^*}{x_d'} = \sqrt{2} \cdot \left(\frac{1}{0,15} - \frac{1}{0,35} \right) = \sqrt{2} \cdot 3,81 = 5,38 \text{ в. о.}$$

$$I_{нм}'' = 5,37 \cdot 8 = 43 \text{ кА}$$

$$I_{нм}^{*'} = \frac{E_m^*}{x_d'} - \frac{E_m^*}{x_d} = \sqrt{2} \cdot \left(\frac{1}{0,35} - \frac{1}{1,7} \right) = \sqrt{2} \cdot 2,27 = 3,21 \text{ в. о.}$$

$$I_{нм}' = 3,21 \cdot 8 = 25,68 \text{ кА}$$

$$I_{hm}^* = \frac{E_m^*}{x_d} = \sqrt{2} \cdot \left(\frac{1}{1,7} \right) = \sqrt{2} \cdot 0,58 = 0,82 \text{ в. о.}$$

$$I_{hm} = 0,82 \cdot 8 = 6,56 \text{ кА}$$

Задачі:

6.1 Намалювати схеми заміщення і визначити параметри генератора: $x_d^{*''}, x_d^{*'}, x_d^*, x_q^{*''}, x_q^{*'}, x_q^*$, якщо відомі такі дані: $x_{\sigma a}^* = 0,16$, $x_{ad}^* = 1,2$, $x_{aq}^* = 0,8$, $x_{yd}^* = 0,13$, $x_{\sigma f}^* = 0,2$.

6.2 Визначити у в.о. та амперах амплітудні значення надперехідної, перехідної і усталеної складових періодичного струму раптового трифазного к.з. у фазі якірної обмотки турбогенераторів, якщо перед замиканням генератори працювали в режимі х.х. з напругою на шинах $U^* = 1$. Дані турбогенераторів наведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Варіант Величина	1	2	3	4
I_H , кА	8	1,2	1,43	3
$x_d^{*''}$	0,15	0,12	0,13	0,13
$x_d^{*'}$	0,35	0,17	0,2	0,22
x_d^*	1,7	1,6	2,08	2,12

6.3 Для варіанта № 2 завдання 6.2 побудувати графік перехідного і надперехідного струмів в турбогенераторі, враховуючи постійні часу: $T_d' = 0,8$ с; $T_d'' = 0,04$ с.

6.4 За даними табл. 6.2. визначити для турбогенераторів початкові значення діючих величин: періодичної складової, періодичної складової без надперехідного струму, сталий струм к.з. і амплітудне значення аперіодичної складової струму к.з. До к.з. генератор працював на х.х. з $U^* = 1$. З'єднання фаз обмотки статора “зірка”.

Таблиця 6.2.

Величина Варіант	P_H	$\cos \varphi_H$	$U_{HЛ}$	x_d^*	$x_d^{*'}$	$x_d^{*''}$
---------------------	-------	------------------	----------	---------	------------	-------------

	МВт		кВ			
1	30	0,8	10,5	2,55	0,26	0,15
2	50	0,85	10,5	1,7	0,19	0,13
3	100	0,9	15,75	1,4	0,18	0,12
4	100	0,85	15,75	1,46	0,18	0,12
5	150	0,9	18	1,5	0,18	0,12

- 6.5 Визначити початкові значення аперіодичного струму якірної обмотки у всіх трьох фазах при раптовому трифазному к.з. турбогенераторів, якщо турбогенератори перед замиканням працювали в режимі х.х. з напругою на шинах U_H і початковою фазою к.з. γ_0 . Паспортні дані генераторів вказані в табл. 6.3. З'єднання фаз обмотки статора “зірка”.

Таблиця 6.3

Величина Варіант	P_H , МВт	$U_{нл}$, кВ	$\cos \varphi$	$x_d^{*''}$	γ_0 , град
1	100	13,5	0,85	0,18	60
2	75	10,5	0,8	0,137	30
3	50	6,3	0,6	0,132	0
4	12	3,15	0,8	0,121	120

- 6.6 За умовою задачі 6.5. побудувати криві аперіодичного струму в трьох фазах якірної обмотки, якщо відомі активні опори фаз обмотки якоря для відповідних варіантів табл. 6.3: $r_a^* = 0,35; 0,382; 0,346; 0,455$.
- 6.7 Визначити надперехідний та усталений струми к.з. при трифазному, двофазному і однофазному к.з. турбогенератора з масивним симетричним ротором. Перед виникненням к.з. машина працювала на х.х. і була збуджена так, що E_f відповідала її роботі з номінальним навантаженням. Дані генератора: $x_d^* = 1,2$, $x_d^{*'} = 0,2$, $x_d^{*''} = 0,15$, $x_0^* = 0,08$, $\cos \varphi_H = 0,8$, $k_H = 1,7$.
- 6.8 Визначити сплески аперіодичних струмів в обмотці збудження і заспокійливій обмотці генератора при раптовому трифазному к.з., якщо до к.з. генератор працював на х.х. Дані генератора: $x_d^{*''} = 0,143$, $x_{\sigma a}^* = 0,09$, $x_{\sigma f}^* = 0,14$, $x_{\sigma yd}^* = 0,11$, $x_d^* = 1,5$, $i_{f0} = 80$ А.

- 6.9 Визначити кратність ударного струму раптового трифазного к.з. машини, якщо відомі наступні параметри: $x_d^* = 0,85$, $x_{\sigma a}^* = 0,1$, $x_{\sigma y}^* = 0,13$, $x_{\sigma f}^* = 0,18$. Ударний коефіцієнт прийнятий рівним 1,8.
- 6.10 Визначити кратність ударного струму і постійні часу надперехідного і перехідного процесів явнополюсного генератора при раптовому трифазному к.з. на його затискачах, якщо відомі такі параметри генератора: $x_{ad}^* = 0,57$, $x_{ra}^* = 0,125$, $x_{\sigma f}^* = 0,239$, $x_{\sigma y}^* = 0,172$, $T_{d0} = 4,43$ с. Параметри заспокійливої обмотки, приведені до статора та мають значення: $x_y^{*'} = 0,244$, $r_y^{*'} = 0,0154$. Величину ударного коефіцієнта прийняти рівною 1,8.
- 6.11 Визначити кратність ударного струму в генераторі при раптовому трифазному к.з. на шинах високої та низької напруги підвищуючого трансформатора, що працює в блоці з генератором, якщо $x_d^{*''} = 0,15$, $x_t^* = 0,11$. Згасанням аперіодичних струмів в трансформаторі знехтувати.
- 6.12 Визначити усталені струми к.з. в обмотках якоря генераторів при трифазному, двофазному і однофазному к.з., якщо $E_f^* = 1,3$, а значення параметрів генератора наведено в табл. 6.4. Прийняти $r_a = 0$.

Таблиця 6.4

Варіант Величина	1	2	3	4	5
x_0^*	0,02	0,03	0,04	0,1	0,07
x_1^*	0,7	0,75	0,8	1,1	1,25
x_2^*	0,15	0,17	0,19	0,3	0,35

- 6.13 Визначити параметри x_1 , x_2 , x_0 для генератора з паспортними даними $S_H = 8750$ кВА, $U_{лн} = 11$ кВ, $I_H = 460$ А, $\cos \varphi_H = 0,8$, з'єднання фаз обмотки статора “зірка”. Дані для побудови характеристик к.з. і х.х., пренесені до початку координат, наступні: для однофазного к.з. $I_k = 225$ А, $i_f = 40$ А; для двофазного к.з. $I_k = 430$ А, $i_f = 120$ А; для трифазного к.з. $I_k = 410$ А, $i_f = 140$ А; точки х.х.х. $E_f = 5000$ В, $i_f = 82,8$ А.
- 6.14 В таблиці 6.5 вказані параметри генераторів і навантажень. Визначити фазні струми і напруги генераторів, якщо нульові точки генераторів і навантажень не з'єднані. Прийняти $r_a = 0$.

Таблиця 6.5

Величина Варіант	E_f^*	x_1^*	x_2^*	z_a^*	z_b^*	z_c^*
1	1,3	0,5	0,2	1	1,2	0,8
2	1,4	0,6	0,25	$0,8+j0,6$	$0,9+j0,7$	$0,6+j0,5$
3	1,3	0,7	0,3	1,1	1,3	0,7
4	1,3	0,8	0,35	$0,9+j0,7$	$1+j0,8$	$0,59+j0,4$

6.15 Трифазний генератор має наступні параметри: $E_f^*=1$, $x_1^*=0,5$, $x_2^*=0,2$, $x_0^*=0,1$, $z_a^*=0,8$, $z_b=z_c=0$. Необхідно визначити фазні струми, якщо нульові точки генераторів і навантаження: а) з'єдані, б) не з'єдані.

6.16 Визначити період власних коливань трифазного чотирьохполюсного генератора при нормальному навантаженні і на х.х. Дані генератора наступні: $P_H=500$ кВт, $GD^2=0,15$ т·м², $x_d^*=1,47$, $\cos\varphi_H=0,8$, $E_{fd}^*=1,25$, $U_M=6,3$ кВ, $\theta_H=23^\circ$, $f_1=50$ Гц.

6.17 Визначити частоту власних коливань компресорного двигуна на х.х. і при номінальному навантаженні. Параметри двигуна: $P_H=325$ кВт, $n=375$ об/хв, $U_H=3$ кВ, $I_H=39$ А, $\cos\varphi_H=0,9$, $k_H=2,3$, маховий момент 2 т·м², параметричним моментом знехтувати.

6.18 За даними таблиці 6.6 визначити активну потужність, яку розвиває машина в перехідному режимі. До зміни навантаження машина працювала в номінальному режимі при $U^*=I^*=1$.

Таблиця 6.6

Величина Варіант	θ_H	$\cos\varphi_H$	x_{ad}^*	x_{aq}^*	x_{ra}^*	$x_{\sigma f}^*$
1	20	0,8	0,8	0,18	0,18	0,14
2	25	0,8	1	0,12	0,12	0,12
3	30	0,8	0,9	0,15	0,15	0,13
4	20	0,8	1,4	1,4	1,4	0,15

6.19 Використовуючи метод площин і вирази для статичної і динамічної кутових характеристик, визначити величину максимального набросу моменту супротиву на валу неявнополюсного синхронного двигуна, що працює в режимі х.х., без порушень динамічної рівноваги. Дані двигуна приведені в таблиці 6.7.

Таблиця 6.7

Величина Варіант	x_d^*	$x_d^{*'} $	i_f^*
1	1,2	0,2	1
2	1,4	0,3	1,2

Відповіді до завдань

1.1 Відповіді до задачі приведені в таблиці А.1:

Таблиця А.1

	Турбогенератори	Гідрогенератори
$0 \leq i_f^* \leq 0,5$	$0 \leq E_f^* \leq 0,58$ $E_f^*=1,16i_f^*$	$0 \leq E_f^* \leq 0,53$ $E_f^*=1,06i_f^*$
$0,5 \leq i_f^* \leq 1$	$0,58 \leq E_f^* \leq 1$ $E_f^* = 0,84(i_f^* - 0,5) + 0,58$	$0,53 \leq E_f^* \leq 1$ $E_f^*=0,94(i_f^* - 0,5) + 0,53$
$1 \leq i_f^* \leq 1,5$	$1 \leq E_f^* \leq 1,21$ $E_f^*=0,42(i_f^* - 1) + 1$	$1 \leq E_f^* \leq 1,23$ $E_f^*=0,46(i_f^* - 1) + 1$
$1,5 \leq i_f^* \leq 2$	$1,21 \leq E_f^* \leq 1,33$ $E_f^*=0,42(i_f^* - 1,5) + 1,21$	$1,23 \leq E_f^* \leq 1,3$ $E_f^*=0,14(i_f^* - 1,5) + 1,23$
$2 \leq i_f^* \leq 2,5$	$1,33 \leq E_f^* \leq 1,46$ $E_f^*=0,14(i_f^* - 2) + 1,33$	
$2,5 \leq i_f^* \leq 3$	$1,4 \leq E_f^* \leq 1,46$ $E_f^*=0,12(i_f^* - 2,5) + 1,4$	
$3 \leq i_f^* \leq 3,5$	$1,46 \leq E_f^* \leq 1,51$ $E_f^*=0,1(i_f^* - 3) + 1,46$	

1.4 $k_{fmax}=1,275$ при $\gamma=0$; $k_{fmin}=0,812$ при $\gamma=1$. Для неявнополюсних машин зазвичай $k_{fmax}=1,065+0,965$. 1.5 $B_{fm1} = 0,917$. 1.6 $B_{fm1}=0,354$ при $E_\infty=0,53$. 1.7 $B_{fm1}=0,885$ при зміні i_f^* на +10%. 1.8 $M_{fad\infty}=0,045$ Ом, $x_{fad\infty}=12,7$ Ом. 1.9 $E_{f1}=3,64$ кВ, $E_{f1л}=6,3$ кВ, $E_{f3}=5,64$ В, $E_{f3л}=0$, $E_{f5}=E_{f5л}=0$, $E_{f7}=1,83$ В, $E_{f7л}=3,16$ В.

2.1 $U^*=0,95$, $I^*=1$, $x_{\sigma a}^* = 0,144$, $r_a^* = 0,0127$. 2.2 $U = 3,56$ кВ, $I = 186$ А, $x_d = x_q = 32,9$ Ом. 2.3 $F_{ad} = 8$ кА. 2.4 $B_{adm1} = 0,244$ Тл, $B_{aqm1} = 0,218$ Тл. 2.5 $F'_{ad} = 2300$ кА, $F'_{aq} = 965$ кА, $I'_d = 56,5$ А, $I'_q = 27,2$ А. 2.6 $I_K = 14,6$ i_{fK} , $I_K^* = i_{fK}^*$. 2.7 $x_d^* = 1,5$, $x_{d\infty}^* = 1,74$, $x_d = 31,6$ Ом, $x_{d\infty} = 37,7$ Ом. 2.8 $x_d^* = 0,6$, $x_d = 1,03$ Ом. 2.9 $x_{d\infty}^* = 1,61$, $x_d^* = 1,43$. 2.10 $BK3 = 0,82$, $x_d^* = 1,22$. 2.11 $i_{fK}^* = 0,61$, $x_d^* = 0,735$. 2.12 $k_{\mu d} = 1,4$. 2.13 $x_d^* = 1,5$, $x_{d\infty}^* = 1,74$, $BK3 = 0,668$, $k_{\mu d} = 1,16$. 2.14 $k_{id} = 0,9$. 2.15 $x_{\sigma a}^* = 0,25$.

3.1 $E_{fH}^* = 1,85$, $\theta_H = 21^\circ$, $\psi_H = 58^\circ$. 3.2 $E_f^* = 0$. 3.3 $E_{f\infty}^* = 2,24$, $\psi = \theta = 63^\circ$. 3.4 $\theta = 42^\circ$, $\varphi = 23^\circ$, $\psi = 65^\circ$. 3.5 $U = 0,45$ кВ, $\theta = 34^\circ 30'$, $\varphi = 7^\circ 30'$. 3.6 $Q = 3,34$ МВАр. 3.7 $U^* = 1,41$ при $\cos\varphi = 1$. 3.8 $E_\delta^* = 1,21$, $\theta = 8^\circ$. 3.9 $i_{fK}^* = 3,78$. 3.10 $i_f = 384$ А, $\Delta U = 43\%$. 3.11 $\cos\varphi_{min} = 0,63$ при $I_K = 2280$ А. 3.12 $U^* = 1,4$. 3.13 $i_f^* = 2,4$ А, $E_f^* = 2,2$, $E_{fH}^* = 2,79$. 3.14 $x_d^* = 1,53$, $x_{d\infty}^* = 1,87$, $E_f^* = 2,28$, $E_{f\infty}^* = 3$. 3.15 $\Delta x_{ad} = -8,5\%$, $\Delta i_f = 9,6\%$, $\Delta E_f = 2\%$. 3.16 $k_{id} = 1,22$, $x_{ad}^* = 1,34$. 3.19 $U^* = 1,35 - 0,35 I^*$. 3.20 $U^* = 1,25 - 0,25 I^*$ при $\cos\varphi = 0,8$ (інд.). 3.21 $i_f^* = 1 + 0,69 I^*$.

4.1 $E_f^* = 1,2$, $I^* = -j0,1$, $Q = -j11,75$ МВАр. 4.2 $I^* = 0,261$, $Q = j0,057$ МВАр, $P = 0,321$ МВт. 4.3 а) $P = 4,05$ МВт, $Q = 0,725$ МВАр; б) $P = 4,85$ МВт, $Q = 0,33$ МВАр. 4.4 $i_f^* = \frac{1}{\cos\theta}$, $\theta_H = 57^\circ 12'$. 4.5 $P^* = 0,8$, $Q^* = 0,6$, $\theta = 30^\circ$. 4.6 $P_1 = 685$ кВт, $M_{em} = 2180$ Н·м. 4.7 $P^* = 0,212$, $Q^* = -j1,12$. 4.8 $P_{cm}^* = M_{cm}^* = 0,52$. 4.9 $\theta = 25^\circ$ при $E_f^* = 2,06$. 4.10 $i_f^* = \frac{1}{1 - \sin 2\theta}$. 4.11 $k_H = 2,22$, $\theta_H = 26^\circ$. 4.12 $i_{fH}^* = 1,89$, $E_f = 7,6$ кВ, $P = 500$ кВт, $k_H = 2$. 4.14 $P_1 = 5,44$ кВт, $\Sigma P = 0,44$ кВт, $\eta = 0,97$. 4.15 $I_H = 166$ А, $\cos\varphi_H = 0,8$. 4.16 $P_H = 100$ кВт. 4.17 При $I_a = 0$: $I^* = 0,834(i_{fH}^* - I^*)$ для $i_{fH}^* > I^*$; $I^* = 0,834(I^* - i_{fH}^*)$ для $i_{fH}^* < I^*$. 4.19 $I^* = \frac{\sqrt{1 + i_{fH}^{*2}}}{x_{ad}}$.

5.1. $\theta_H = 23^\circ$, $E_{fH}^* = 2,1$. 5.2. $Q^* = 0,62$. 5.3. $Q = -j 550$ кВАр. 5.4. $M_H = 0,3$ нМ, $Q = -j 0,37$ кВА, $\cos\varphi_H = 0,332$. 5.5. $P_M^* = 0,284$, $I^* = 1,07$. 5.6. $k_H = 1,87$. 5.7. $Q = 5,95$ кВАр. 5.8. Зменшення у 2,38 рази. 5.9. При $\cos\varphi' = 0,95$; $Q_k = 600$ кВАр, $I_M = 138$ А до компенсації, $I_M = 104$ А після компенсації. 5.10. $I_2 = 1342$ А, $\cos\varphi_2 = 0,45$. 5.11. При холостому ході $S_0 = 1270$ кВА, при номінальному навантаженні $S_H = 1990$ кВА. Оскільки компенсатор на отриману потужність не випускається, то в такому випадку в якості компенсатора слід використати двигун на вказану потужність з урахуванням того, що він повинен працювати при $\cos\varphi = 0$. 5.12. $Q = 7085$ кВАр. 5.13. $I = 460$ А, $S = 8350$ кВА. 5.14. У режимі недозбудження $Q^* = 0,665$, при від'ємному збудженні $Q^* = 1,11$.

6.1. $x_d^{*''} = 0,234$, $x_d^{*'} = 0,331$, $x_d^* = 1,36$, $x_q^{*''} = 0,279$, $x_q^* = 0,96$, $x_2 = 0,263$.
 6.2. $I_{hm}^{*''} = 5,38$, $I_{hm}^{''} = 43$ кА, $I_{hm}^{*'} = 3,21$, $I_{hm}' = 25,68$ кА, $I_{hm}^* = 0,82$, $I_{hm} = 6,56$ кА. 6.4. $I_{hm}^{''} = 25,7$ кА, $I_{hm}' = 16,7$ кА, $I_{hm\infty} = 4,5$ кА. $I_{am} = 32,8$ кА. 6.5. $I_{amA} = 18,88$ кА, $I_{amB} = -37,76$ кА, $I_{amC} = 18,88$ кА. 6.7. Відповіді до задачі приведені в таблиці А.2:

Таблица А.2

Параметр Вид к.з.	$I_{hm}^{*''}$	$I_{hm}^{*'}$	I_{hm}^*
однофазне	12,9	11,4	3,42
двофазне	9,4	7,06	2,01
трифазне	10,8	8,12	1,35

Перелік рекомендованої літератури

1. Вольдек А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
2. Андриєнко В.М., Куєвда В.П. Електричні машини. Київ, НУХТ, 366 с.
3. Кацман М.М., Электрические машины. М., Высшая школа, 1990. -464 с.
4. Копылов И.П. Электрические машины / И. П. Копылов. – М.: Логос, 2000. – 607 с.
5. Костенко М.П. Электрические машины, т.2 / М.П. Костенко, Д.М. Пиотровский. – Л.: Энергия, 1973. – 648 с.
6. Читечян В.И. Электрические машины. Сборник задач. М.: Высшая школа, 1988. - 231 с.
7. Данку А., Фаркаш А., Надь Л. Электрические машины. Сборник задач и упражнений. М.: Энергоатомиздат, 1984. - 362 с.
8. Куликов А.А. Сборник задач по электрическим машинам / А.А. Куликов, М.И. Немировский. – М.-К.: Машгиз, 1961. – 200 с.
9. Меркин Г.Б. Электрические машины и трансформаторы: пособие по решению задач / Г.Б. Меркин, Н.П. Титов, С.П. Печерица. – Л.: Изд-во Северо-Зап. заоч. политех. ин-та, 1969. – 277 с.
10. Петров Г.Н. Электрические машины, т.2 / Г.Н. Петров. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 416 с.
11. Брандина Е. П., Электрические машины. Письменные лекции. Примеры решения задач.- СПб.: СЗТУ, 2004. - 152 с.